ELETTRONICA E TELECOMUNICAZIONI

ANNO XXXIX NUMERO 3 - 1990 EDIZIONI NUOVA ERI - Via Arsenale, 41 - TORINO L. 5000

(Foto Valesio)

Spedizione in abbonamento postale gruppo IV/70, n. 3 - 2° sem. 1990

SPECIALE ITALIA '90

Trasmissioni punto-multipunto di Televisione ad Alta Definizione digitale

NUMERO 3 ANNO XXXIX	NOVEMBRE 1990 DA PAGINA 97 A PAGINA 148

RIVISTA QUADRIMESTRALE
A CURA DELLA RAI
EDITA DALLA NUOVA ERI

DIRETTORE RESPONSABILE
ROLANDO SALVADORINI

COMITATO DIRETTIVO
M. AGRESTI, F. ANGELI,
G. M. POLACCO, R. CAPRA

REDAZIONE PRESSO
CENTRO RICERCHE RAI
CORSO GIAMBONE, 68
TEL. (011) 88 00 (int. 31 32)
10135 TORINO

Concessionaria esclusiva della pubblicità:
SOC. PER LA PUBBLICITÀ IN ITALIA (SPI)
20121 MILANO - VIA MANZONI 37 - TEL. (02) 63131

Distribuzione per l'Italia:
Parrini & C. - p. Indipendenza 11/B
00185 Roma - Tel. (06) 49.92

Affiliato alla Federazione Italiana Editori Giornali

Stampa: ILTE - Moncalieri (Torino)

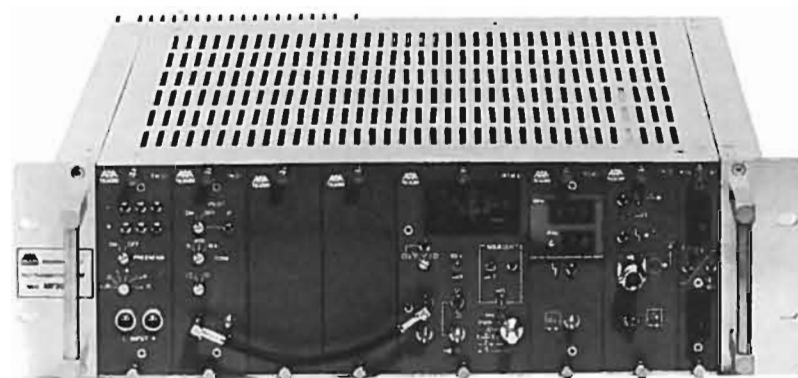
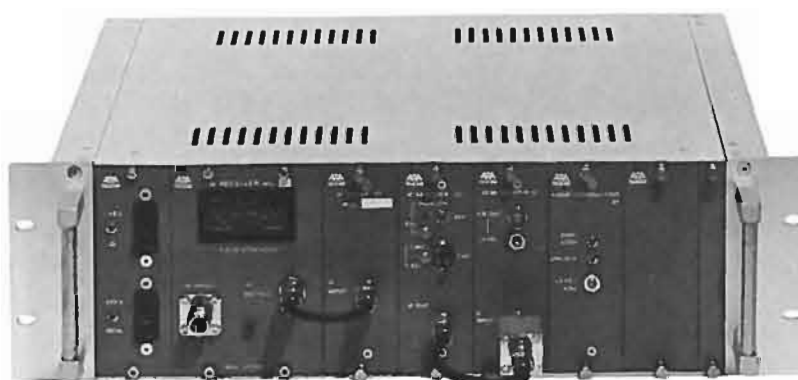
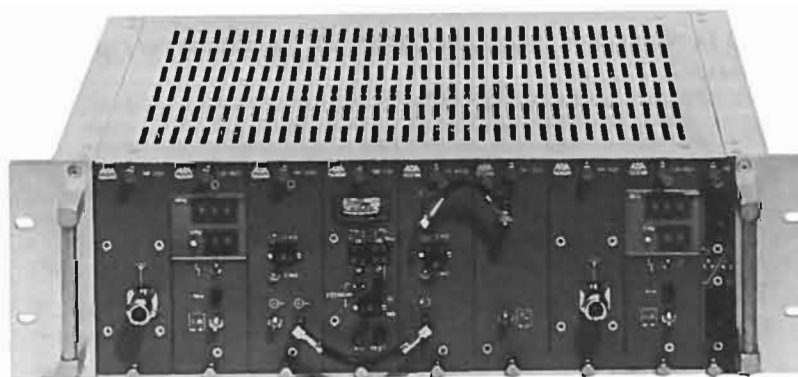
Esperimenti di trasmissione digitale o numerica punto-multipunto di Televisione ad Alta Definizione effettuati, in diretta, dalla RAI in occasione dei Campionati Mondiali di Calcio ITALIA '90.
Le partite venivano riprese secondo due formati di scansione: quello europeo a 1250 righe/50 Hz nello stadio Olimpico di Roma e quello NHK a 1125 righe/60 Hz negli stadi di altre città.
L'intera catena di trasmissione funzionava sia con l'uno che con l'altro formato.
Per la ricezione sono state allestite in varie città, sale di visione dotate di proiettori HDTV su grande schermo.
Gli esperimenti hanno avuto un grande successo, sia per l'altissima qualità delle immagini, che per l'effetto di coinvolgimento che hanno provocato nel pubblico presente nelle sale.
La fotografia mostra una delle sale di visione e l'entusiasmo degli spettatori a Torino dopo il goal di Totò Schillaci nella partita Italia-Cecoslovacchia.

ELETTRONICA E TELECOMUNICAZIONI

Sommario: *pagina*

UNA COPIA L. 5000 (ESTERO L. 10000)
COPIA ARRETRATA L. 6000 (ESTERO L. 11000)
ABBONAMENTO ANNUALE L. 12000 (ESTERO L. 24000)
VERSAMENTI ALLA NUOVA ERI - VIA ARSENALE, 41 - TORINO - C.C.P. N. 26960104

SPEDIZIONE IN ABBONAMENTO POSTALE - GRUPPO IV/70

REG. ALLA CANCELLERIA DEL TRIBUNALE C.P. DI TORINO AL N. 494 IN DATA 6-11 1951

ITALIA '90: UN PASSO SIGNIFICATIVO VERSO LA TELEVISIONE AD ALTA DEFINIZIONE

GIANFRANCO BARBIERI*

SOMMARIO — La televisione ad alta definizione: un servizio che darà agli utenti immagini di straordinaria nitidezza e fedeltà, una rivoluzione tecnologica che coinvolge interessi industriali per migliaia di miliardi. In occasione dei Campionati Mondiali di Calcio (Italia '90), la RAI ha offerto una dimostrazione del grado di spettacolarità e coinvolgimento che questo nuovo mezzo è in grado di fornire; in prima mondiale è stato attuato, su base sperimentale, un collegamento numerico punto-multipunto via satellite che ha consentito di trasmettere in tempo reale le partite a un certo numero di punti di visione dotati di grande schermo. Il sistema di collegamento è stato concepito presso il Centro Ricerche della RAI e sviluppato in collaborazione con l'industria manufatturiera nazionale.

SUMMARY — ***A significant step towards the high definition television:*** *- HDTV: a new service which offers pictures of extraordinary revolution and fidelity, a technological revolution which involves a considerable amount of industrial businesses. During the FIFA World Cup (Italia '90) RAI has given a demonstration of the spectacular performances that this new tool can offer; for the first time in the world, a fully digital chain for point-to-multipoint transmission of HDTV via satellite chain has been put into operation for transmitting in live the football matches to a number of viewing rooms, provided with large screen. The transmission chain has been conceived by the Research Centre of the RAI and developed in co-operation with the national manufacturers.*

La televisione ad alta definizione è argomento di cui si parla con grande interesse ormai da diversi anni, in particolare dall'inizio degli anni '80, da quando cioè i giapponesi cominciarono a dimostrare la fattibilità di vere e proprie produzioni televisive realizzate con questa nuova tecnologia.

Tra le novità emergenti dall'imponente trasformazione oggi in atto nei grandi mezzi di comunicazione di massa, l'HDTV è stata identificata come area di grande rilevanza strategica in quanto essa costituisce un passo significativo verso la TV della «terza generazione». Come già l'avvento del colore ha operato a suo tempo una profonda evoluzione del sistema televisivo, così l'HDTV può rappresentare un evento altrettanto eccezionale: immagini di straordinaria nitidezza, colori più fedeli, visione panoramica su schermi più grandi di quelli convenzionali, il tutto accompagnato da un suono di qualità paragonabile a quello del compact-disc.

La RAI, per tradizione, ha sempre seguito con grande attenzione l'innovazione tecnologica e negli ultimi anni ha ulteriormente accentuato questo suo interesse; l'Alta Definizione, costituisce un modo assolutamente nuovo di produrre che esalta al massimo le potenzialità artistico-espressive del mezzo di ripresa ed incide profondamente sul modo di osservare i programmi.

In questo senso l'impegno della RAI nelle produzioni sperimentali in HDTV rappresenta una precisa scelta a favore del pubblico e della sua domanda di qualità. Per verificare le potenzialità del mezzo, la RAI ha intrapreso fin dall'inizio degli anni '80 una intensa attività sperimentale utilizzando i vari standard di produzione offerti dal mercato, cominciando da quello giapponese e passando a quello europeo (1250 righe/50 semiquadri al secondo) non appena quest'ultimo è stato disponibile.

I Campionati Mondiali di Calcio (*Italia '90*) svoltisi nel giugno scorso hanno offerto un ulteriore severissimo banco di prova per la TV del futuro; due linee di produzione in Alta Definizione sono state attivate e rese operative in modo indipendente: la prima, funzionante a 1250/50, era gestita dalla RAI nell'ambito del progetto europeo EUREKA EU95; la seconda, funzionante a 1125/60, operava in coproduzione tra la RAI e la giapponese NHK.

L'elemento nettamente innovativo della sperimentazione è consistito nell'aver attivato, in anteprima mondiale, un sistema di collegamento punto-multipunto via satellite Olympus interamente numerico, ideato e messo a punto presso il *Centro Ricerche* della RAI. Il sistema, descritto in maggior dettaglio nei vari articoli di questo numero speciale della rivista, era costituito da un complesso di installazioni comprendente tratte in fibra ottica, due stazioni trasmittenti via satellite (una fissa ed una mobile) otto postazioni riceventi attrezzate con proiettori su grande schermo, oltre alle varie unità di monitoraggio e supervisione.

Protagonista dell'esperimento è stato il codificatore HDTV numerico che, operando con sofisticati algoritmi di riduzione di ridondanza, ha reso possibile la trasmissione, senza alterare la qualità delle immagini, attraverso un canale a banda stretta come è quello del satellite Olympus utilizzato per la sperimentazione di RAI-SAT; il codificatore è stato studiato nel quadro del progetto europeo

* Ing. Gianfranco Barbieri del Centro Ricerche RAI (Torino).
Dattiloscritto pervenuto alla Redazione il 23 agosto 1990.

EUREKA EU256 che ha visto come protagonisti la RAI e la Telettra da parte italiana e Retevision, Telettra Espana, Università di Madrid per la parte spagnola. Lo sviluppo in «hardware» dell'apparato è stato curato dalla Telettra.

Un secondo elemento determinante, ai fini della fattibilità della sperimentazione, è stato la ottimizzazione dell'intero collegamento numerico effettuato presso il *Centro Ricerche* RAI tramite simulazione al calcolatore e prove sperimentali. Gli studi suddetti sono stati condotti analizzando le caratteristiche delle varie unità componenti il collegamento. Sulla base dei risultati ottenuti, sono state sviluppate apposite unità riceventi, per ora non disponibili sul mercato, adatte ad operare con segnali numerici; si sono inoltre ottimizzate le prestazioni della stazione fissa (che in origine era stata progettata per trasmissioni TV/MF analogiche) e si sono definiti i dati di progetto della stazione mobile.

L'intera catena di trasmissione è stata progettata, grazie alla estrema flessibilità dei sistemi numerici, per operare in modo trasparente ai differenti formati di scansione attualmente in discussione presso gli organismi internazionali; ciò ha reso possibile la visione degli eventi ripresi da entrambe le linee di produzione.

Nel corso dell'intera manifestazione sono state riprese e trasmesse in diretta 16 partite più un certo numero di repliche in differita; poiché la capienza media delle sale visione si aggirava intorno alle 100 ÷ 150 persone, un totale di circa 1000 persone per partita ha potuto assistere agli esperimenti. Il grado di coinvolgimento degli spettatori era particolarmente evidenziato dalla vistosa partecipazione emotiva alle fasi agonisticamente significative dei vari incontri.

La qualità delle immagini riprodotte, valutata sia sugli schermi grandi che sui monitori professionali di controllo, è sempre risultata paragonabile alla qualità da studio; il funzionamento dell'intera catena di trasmissione numerica si è rivelato pienamente affidabile anche in condizioni di propagazione decisamente critiche a causa di temporali.

Il successo della sperimentazione ha dimostrato la fattibilità tecnico-operativa di un sistema totalmente numerico per il trasporto punto-multipunto, via fibra ottica e satellite, di programmi HDTV con il mantenimento della qualità tecnica della sorgente. La sperimentazione è stata condotta con la partecipazione ed il contributo dell'Istituto Superiore del Ministero delle Poste e delle Telecomunicazioni.

La disponibilità di un tale sistema è suscettibile di avere un impatto non trascurabile nel decollo, su base industriale, delle tecnologie legate alla HDTV.

Nel trattare le problematiche di sviluppo della HDTV si fa generalmente riferimento all'applicazione più ovvia: la diffusione al grande pubblico. Nonostante il grande sforzo prodotto dall'industria "consumer", sia europea che giapponese, si ritiene che siano necessari ancora alcuni anni prima che i ricevitori domestici HDTV vengono resi disponibili sul mercato a prezzi accettabili dall'utenza. Le società di produzione dei programmi devono, tuttavia, programmare adeguati investimenti negli impianti con notevole anticipo rispetto alle date previste per l'attuazione di un servizio rivolto al grande pubblico; la rete dei collegamenti, cioè l'infrastruttura che consente di trasportare il segnale verso impianti di produzione distanti, è solitamente parte integrante del sistema di produzione.

In realtà, lo sviluppo dell'Alta Definizione, sembra avvalersi anche di una diversa prospettiva; i vantaggi da essa offerti in termini di qualità e di processabilità dell'immagine contribuiscono alla promozione di un certo numero di applicazioni sia in campo industriale che in quello commerciale, le quali, essendo meno vincolate da fattori di costo, avranno verosimilmente una penetrazione più rapida. Tra le più importanti, vale la pena citare la telemedicina, la telediagnostica, le applicazioni in campo educativo, la distribuzione di messaggi audiovisivi a grandi gruppi di utenti (sale d'aspetto, ristoranti, hotel, discoteche), la telesorveglianza industriale, le applicazioni militari. Molte di tali applicazioni «non broadcast» sono in grado di sfruttare al massimo le potenzialità offerte dall'HDTV avvalendosi della codifica e trasmissione numerica via fibra ottica o satellite.

L'elenco degli operatori industriali che sono stati coinvolti, in varia misura, nell'allestimento della sperimentazione suggerisce un'ultima importante considerazione. Oltre alla già citata Telettra, partner della RAI nel progetto EU256 e artefice dello sviluppo dei codec, le due stazioni trasmittenti, di proprietà, rispettivamente, Telespazio e RAI, sono state costruite dalla Selenia Spazio; i proiettori HDTV su grande schermo sono stati forniti in gran parte dalla Seleco. Non può essere sottovalutata la rilevanza strategica di un esperimento che ha visto operare in sinergia il settore del servizio pubblico ed alcune tra le più significative realtà dell'industria elettronica nazionale nello sviluppo di una tecnologia destinata ad avere, negli anni novanta, un impatto colossale sul mercato mondiale. (3907)

ITALIA '90: PRIMA MONDIALE DI COLLEGAMENTO NUMERICO IN HDTV VIA SATELLITE

M. ARDITO, G. BARBIERI, M. COMINETTI*

SOMMARIO — I Campionati Mondiali di Calcio disputatisi recentemente in Italia, oltre ad aver rappresentato il più importante evento sportivo del 1990, hanno offerto l'occasione per sperimentare la fattibilità di un sistema di trasmissione punto-multipunto via satellite Olympus interamente numerico. Nel corso della manifestazione, sono state riprese in HDTV e trasmesse «in diretta» 16 partite. I segnali erano generati negli stadi si calcio di varie città con due catene di produzione indipendenti operanti rispettivamente a 1250 linee/50 Hz e 1125 linee/60 Hz e venivano codificati in forma numerica a 70 Mbit/s, impiegando il codec sviluppato nel quadro del progetto europeo Eureka EU-256. Trasmessi con modulazione QPSK tramite il satellite Olympus, erano ricevuti e presentati su grande schermo in sale di visione appositamente attrezzate, otto installate in Italia e due in Spagna. La sperimentazione, concepita, sviluppata e coordinata dal Centro Ricerche della RAI, era basata sulla realizzazione, in prima mondiale, di un sistema di trasporto del segnale HDTV interamente numerico che comprendeva il canale da satellite e collegamenti in fibra ottica. I componenti chiave del sistema, quali il codec HDTV ed i sistemi riceventi, sono stati realizzati in sinegia con le realtà industriali nazionali.
L'articolo descrive la configurazione del sistema di trasmissione, le modalità degli esperimenti nel contesto più generale di Italia '90 e presenta le possibili applicazioni del sistema sia in campo «broadcast» che in campo «non broadcast».

SUMMARY — **Italia '90: World premiére of a fully digital HDTV broadcasting system via satellite:** - *The recent FIFA World Cup 1990 (Italia '90) marked the occasion of experimenting the feasibility of a fully digital system for the point-to multipoint HDTV transmission via Olympus satellite. In this circumstance 16 football matches were shot and live transmitted. The signals were generated in the stadiums of various towns by two independent production chains, operating at 1250 lines/50 Hz and 1125 lines/60 Hz, respectively, and were digitally encoded at 70 Mbit/s by means of the codec developed in the framework of the EUREKA EU-256 European Project. They were transmitted with QPSK modulation via Olympus satellite to eight viewing theatres in Italy and two in Spain, all equipped with large screen projectors. The experiment, conceived, developed and co-ordinated by the RAI Research Centre, was based on the implementation, first in the world, of a fully digital HDTV signal transport system which included the satellite channel as well as an optical fiber link. The main elements of the system, such as the HDTV codec and the receiving parts were implemented in synergy with the Italian industrial realities.*
The paper describes the configuration of the transmission system, the experiment conditions in the more general context of Italia '90 and describes the possibile applications both in «broadcast» and «non broadcast» fields.

1. Introduzione

I satelliti sono stati i grandi protagonisti della diffusione delle immagini dei Campionati Mondiali di calcio e, grazie al loro impiego, i segnali generati in dodici stadi italiani, teatro del più importante evento sportivo del 1990, hanno potuto essere distribuiti in tutto il mondo. Se, per quanto concerne la televisione convenzionale, la fitta rete di collegamenti ha svolto la funzione di soddisfare pressanti esigenze di diffusione di massa a livello mondiale, per quanto concerne la TV ad Alta Definizione, la disponibilità del satellite Olympus ha offerto l'occasione di allestire un complesso sistema di trasmissione, comprendente collegamenti in fibre ottiche, per il trasporto in tempo reale delle immagini HDTV riprese in vari stadi, dal luogo di generazione ad un certo numero di sale attrezzate con grandi schermi e dislocate sul territorio nazionale.

Già in occasione delle Olimpiadi di Seul '88, la NHK aveva organizzato un esperimento similare, seppure di portata più limitata, utilizzando come sistema di trasmissione HDTV il formato MUSE.

Nel caso di Italia '90 occorre tuttavia sottolineare il carattere nettamente innovativo delle dimostrazioni: la sperimentazione, concepita, sviluppata e coordinata dal *Centro Ricerche* RAI, era basata, per la prima volta nel mondo, su un sistema di trasporto del segnale HDTV via satellite interamente numerico; i componenti chiave della catena di trasmissione sono stati progettati e realizzati in sinergia con le realtà industriali nazionali.

* Pi. Maurizio Ardito, ing. Gianfranco Barbieri, dott. Mario Cominetti del Centro Ricerche RAI - Torino.
Dattiloscritto pervenuto alla redazione il 12 settembre 1990.

Lo sviluppo del sistema, nella configurazione impiegata a Italia '90, è stato reso possibile dall'esistenza del codec numerico HDTV in grado di ridurre il flusso binario da circa 1 Gbit/s fino a 70 Mbit/s, senza apprezzabile degradazione del segnale di sorgente; una tale velocità di trasmissione associata ad una modulazione QPSK ha consentito di accedere, previa ottimizzazione dell'intera catena di trasmissione, al canale 24 del satellite Olympus. La disponibilità di un canale da satellite ad elevata potenza e copertura nazionale, ha dimostrato, in definitiva, la fattibilità di un collegamento punto-multipunto di ricezione su tutto il territorio; un ulteriore punto di ricezione è stato allestito in Spagna, a Barcellona, dalla Retevision nonostante la collocazione geografica ampiamente marginale rispetto all'area di copertura dell'Olympus, a riprova della notevole affidabilità del sistema.

Il codec numerico, grazie alla flessibilità della sua architettura interna, è in grado di funzionare in modo trasparente ai vari formati di scansione HDTV oggi in discussione al CCIR (Comitato Consultivo Internazionale di Radiocomunicazioni). Tale prerogativa ha offerto lo spunto per conferire un'ulteriore elemento di originalità alla sperimentazione: il sistema di trasmissione era in grado di operare indifferentemente nei due formati di scansione attualmente in discussione al CCIR, secondo i quali sono state effettuate le riprese (1250 righe/50 Hz e 1125 righe/60 Hz).

Il presente articolo descrive la configurazione del sistema di trasmissione, le modalità degli esperimenti, la loro articolazione nel contesto del più generale evento rappresentato dai Mondiali di Calcio ed inoltre in esso vengono discusse le possibili applicazioni del sistema, sia in campo «broadcast», che in campo «non-broadcast».

2. Configurazione dell'esperimento

Il complesso di impianti sviluppati per attuare il collegamento numerico punto-multipunto era strutturato secondo lo schema di massima di figura 1.

I programmi venivano generati da due catene di produzione indipendenti operanti, rispettivamente, a 1250 righe/50 Hz e 1125 righe/60 Hz.

La prima linea di produzione era gestita dalla RAI nel quadro della sua partecipazione al progetto Eureka EU 95; essa operava in permanenza presso lo stadio Olimpico di Roma e si avvaleva di due pulman di ripresa interconnessi, equipaggiati con apparati funzionanti secondo il formato europeo. Mediante questa linea di produzione si sono effettuate le trasmissioni di sei partite, compresa la finale, giocata a Roma.

Una seconda linea di produzione, installata su una unità mobile della NHK, operava secondo il formato 1125/60 Hz e si spostava per effettuare riprese negli stadi di Milano (3 partite trasmesse), Napoli (4 partite inclusa la semifinale), Torino (2 partite), Firenze (1 partita) e Bari (1 partita). Le riprese venivano effettuate in coproduzione RAI-NHK.

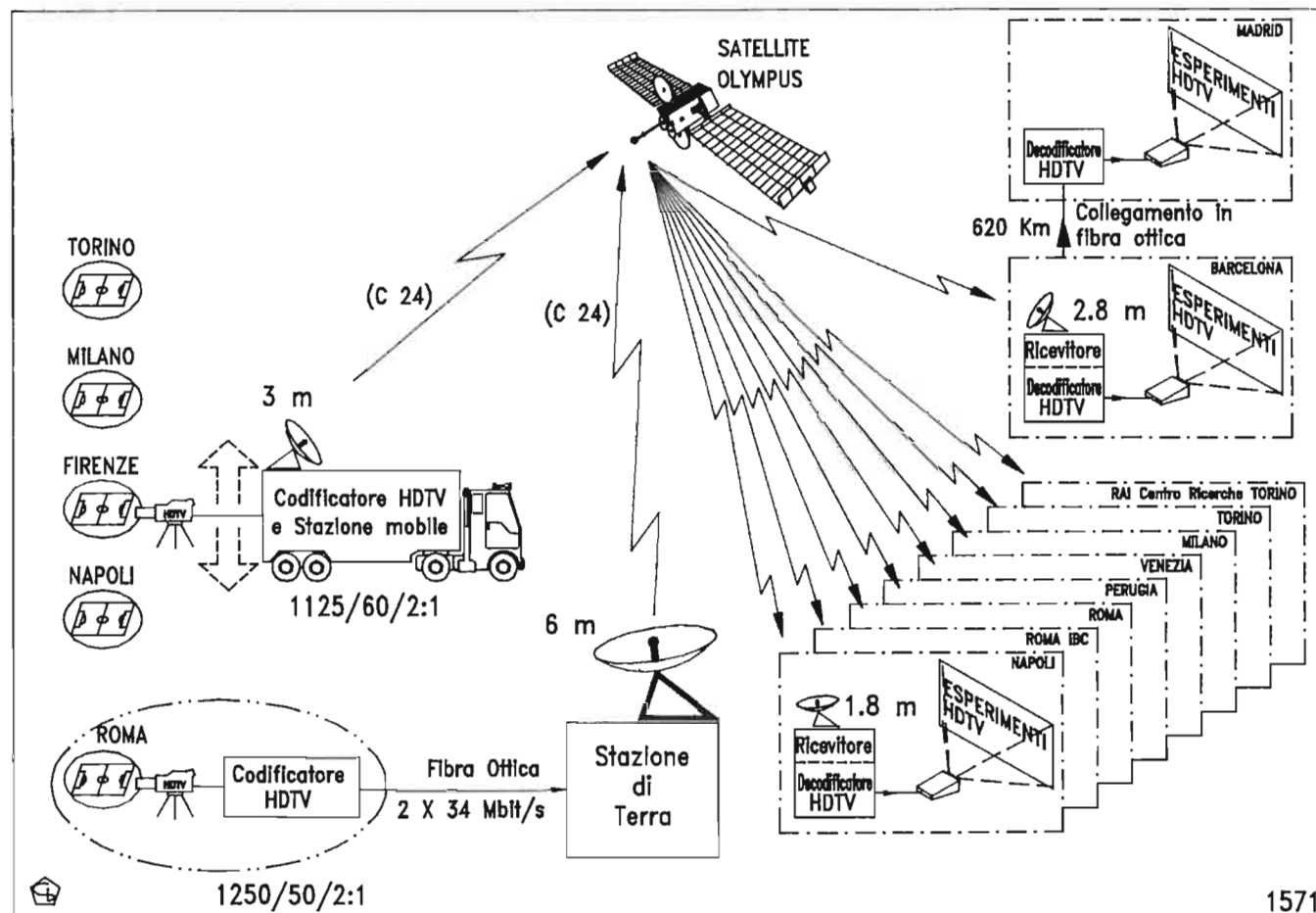



Fig. 1 — Schema riassuntivo degli impianti utilizzati per il collegamento punto-multiplo in HDTV numerica via satellite Olympus.

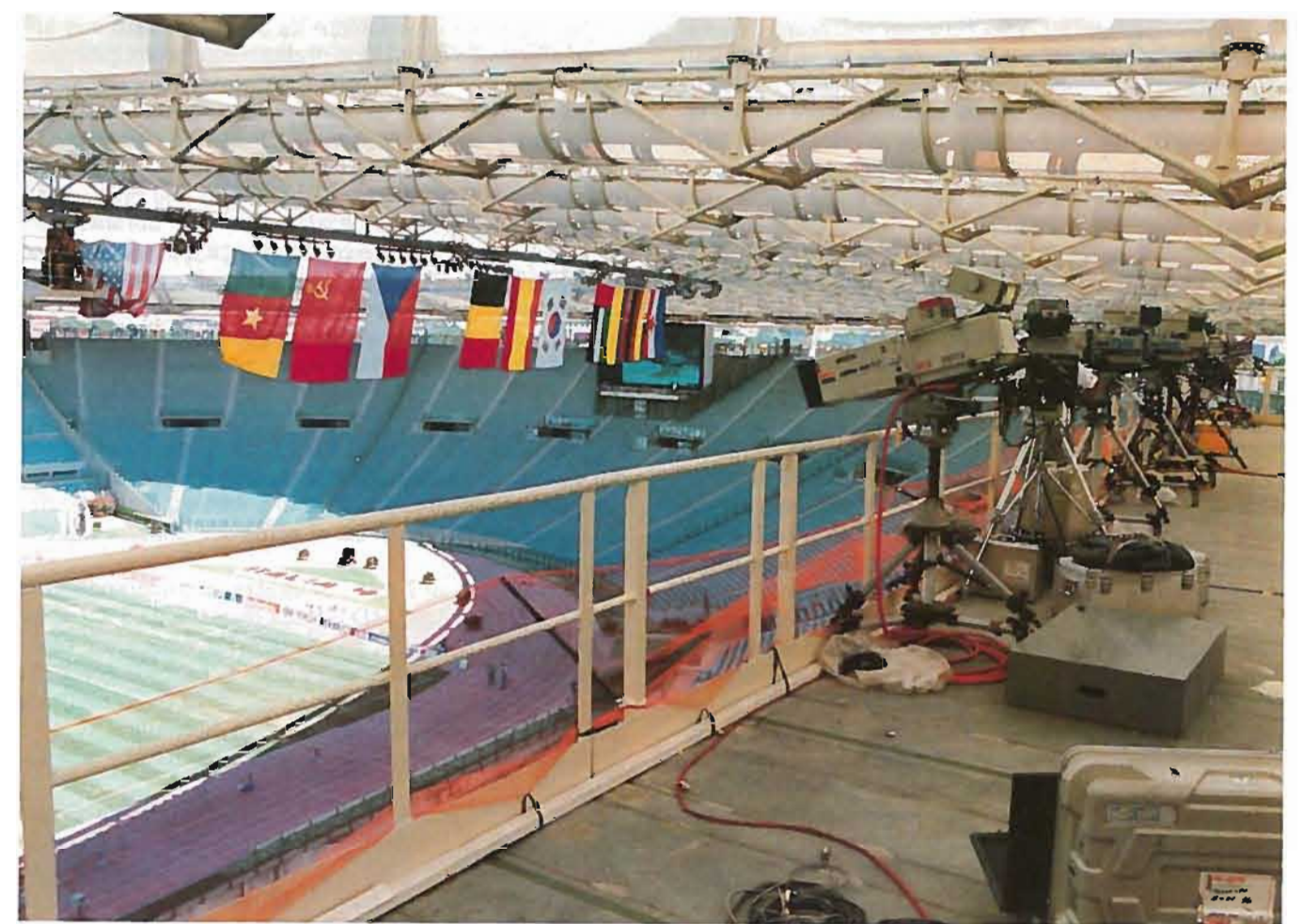



Fig. 2 — Vista di una delle postazioni di ripresa video (in primo piano la telecamere in HDTV) allo stadio Olimpico di Roma.

La trasmissione verso il satellite Olympus avveniva tramite una stazione fissa, ubicata presso il Centro di Produzione TV di Via Teulada in Roma, per le partite riprese allo Stadio Olimpico e tramite una stazione mobile che si spostava al seguito della unità di ripresa HDTV, per le partite giocate fuori Roma.

I segnali HDTV, generati in bassa frequenza dai mezzi di ripresa, venivano immessi nel sistema di collegamento punto-multipunto attraverso le stazioni trasmittenti attrezzate per il controllo monitorio del segnale proveniente dal satellite; in entrambi i punti di inserzione, il segnale HDTV, proveniente dai programmi di ripresa nel formato in componenti analogiche RGB, veniva convertito in formato numerico e introdotto nel codificatore ove il flusso binario globale, aggirantesi sul Gbit/s, veniva ridotto a 70 Mbit/s; il segnale video numerivo veniva inoltre multiplato ai segnali suono e dati. L'informazione sonora era costituita da tre canali musicali di elevata qualità (CCITT, 384 Kbit/s): una coppia di canali era utilizzata per il suono stereo principale, mentre il terzo canale trasportava le informazioni relative all'effetto ambiente (surround sound).

Nel caso della installazione fissa di Roma, il segnale numerico (audio, video) veniva trasportato dal punto di generazione, presso lo stadio Olimpico, alla stazione trasmittente, installata al Centro di produzione RAI, tramite un collegamento in fibra ottica di lunghezza di circa 2,5 km ed infine inviato al modulatore QPSK per essere trasmesso attraverso il canale 24 del satellite Olympus.

Nel caso della installazione mobile di ripresa, il multiplex erogato dal codificatore HDTV alimentava direttamente il modulatore della stazione trasmittente, operante anch'essa sul canale 24 del satellite Olympus.

Entrambe le stazioni trasmittenti erano attrezzate, a scopi monitori, con un impianto ricevente completo, comprendente il demodulatore QPSK, il decodificatore HDTV digitale, il convertitore digitale/analogico e un monitore di qualità. Dalla sala monitoria del Centro di produzione di Roma il segnale ricevuto dal satellite veniva, inoltre, rinviato tramite collegamento in fibra ottica al punto di inserzione dello stadio Olimpico ove poteva essere visualizzato, a scopi di controllo, dal personale ivi operante.

I segnali numerici HDTV ritrasmessi dal satellite venivano ricevuti in sette postazioni allestite nelle città di Milano, Napoli, Perugia, Roma (2 postazioni), Torino, Venezia. Presso il *Centro Ricerche* RAI a Torino, che funzionava da centrale operativa per coordinare gli esperimenti di trasmissione, era stato inoltre allestito un ulteriore impianto ricevente equipaggiato con vari livelli di monitorie.

La ricezione avveniva, in ciascuna postazione, tramite un'antenna parabolica da 1,8 m di diametro[1], una unità ricevente, il demodulatore QPSK e il decoder HDTV. Il segnale numerico uscente dal decodificatore veniva infine convertito nel formato analogico in componenti RGB per essere distribuito ai proiettori su grande schermo (in alcune postazioni le sale di proiezione erano più di una) e ai vari apparati di controllo.

3. Installazione ricevente allestita in Spagna

Nonostante la Spagna sia in posizione geografica alquanto marginale rispetto all'area di copertura del satellite Olympus (canale 24), è stato ugualmente allestito un punto ricevente a Barcellona a cura di Retevision e Teletra Española, partner di RAI e Telettra nel progetto Eureka EU 256. La postazione era equipaggiata con un'antenna parabolica da 2,8 metri di diametro e con le stesse attrezzature utilizzate in Italia. Il segnale decodificato veniva visualizzato su grande schermo a Barcellona in una sala della capienza di circa 120 persone; il segnale numerico a 70 Mbit/s veniva inoltre inviato, tramite collegamento in fibra ottica di circa 620 km, a Madrid ove era stata allestita una ulteriore sala visione, anch'essa attrezzata con grande schermo. Le proiezioni venivano effettuate a Madrid in concomitanza con la conferenza internazionale Eurotelecom 90 e Expotronica Simposia.

4. Sala visione

Come si è detto, in Italia sono stati attrezzati otto punti riceventi; a Milano, Venezia e Napoli la sala visione era ospitata nelle rispettive sedi RAI; a Roma vi erano due sale, una presso il Centro di produzione Radiofonica della RAI e una presso i nuovi insediamenti RAI di Saxa Rubra (ove durante i Mondiali di Calcio '90 era ospitato l'International Broadcasting Centre), a Perugia la sede della proiezione era situata presso la locale Camera di Commercio ed a Torino presso gli ex stabilimenti industriali della Fiat Lingotto.

Le proiezioni avvenivano, su schermi piani di 3,5 metri di larghezza e 2 di altezza, tramite videoproiettori funzionanti a proiezione diretta mediante tre tubi di tipo CRT. L'illuminazione della sala era ridotta al minimo consentito dalle norme di sicurezza. I videoproiettori erano stati adattati per operare in entrambi i formati di scansione (1250/50 e 1125/60).

Per la disposizione del pubblico si è cercato il più possibile di seguire lo schema di figura 3. Le sale erano anche dotate di un proiettore a 625 linee 50 Hz in grado di proiettare sullo stesso schermo immagini PAL ricevute da canali TV terrestri nel caso di mal funzionamento del collegamento numerico via satellite.

Nonostante l'esperimento sia stato condotto con apparati allo stadio di sviluppo prototipale, merita segnalare che per tutta la durata dei campionati mondiali non si è mai avuto alcun inconveniente di rilievo e non è stata pertanto mai utilizzata la riserva PAL, pur operando in alcuni casi in condizioni ambientali molto critiche: si sono superati ad esempio i 40 gradi centigradi all'interno della stazione mobile durante una trasmissione da Firenze e si è affettuata una trasmissione da Milano durante un fortissimo temporale con grandine.

L'esperienza acquisita ha confermato che, non potendo utilizzare schermi con forte guadagno, che comportano una illuminazione dello schermo non uniforme e la riduzione dell'angolo di visione utile a causa della direttività che ne consegue, la luminosità ottenibile con proiettori a tre tubi su schermi di 7 metri quadrati, in condizioni di definizione ancora accettabili, non è ancora ottimale per manifestazioni in presenza di pubblico; d'altra parte, se si aumenta la luminosità si perde decisamente in definizione.

Con schermi di 2 metri di altezza, considerando utile al fine di una visione HDTV una distanza da 3 a 7 volte l'altezza dello schermo, gli spettatori in condizioni di visione ottimale sono circa un centinaio. Tenendo conto del numero di partite trasmesse, alcune delle quali replicate in giorni successivi, si può stimare in diecimila il numero complessivo di spettatori che hanno assistito alla manifestazione.

Per quanto concerne l'audio, le sale erano attrezzate con diffusori ai lati dello schermo che fornivano l'audio stereofonico tradizionale, contenente il commento ed una parte di effetti, e una serie di altoparlanti, distribuiti in maniera semicircolare nella parte retrostante della sala, che diffondevano il canale «surround» che contribuiva a completare l'effetto presenza della trasmissione in HDTV su grande schermo.

5. Prestazioni del sistema

L'esperienza acquisita durante la sperimentazione in occasione di Italia '90 dimostra che il pubblico è molto interessato alla visione in HDTV su grande schermo di avvenimenti sportivi tanto da immedesimarsi completamente nell'evento. A ciò ha sicuramente contribuito l'impiego del formato di visualizzazione «allargato» (16:9 contro 4:3 della TV convenzionale). Come conseguenza, spesso il tifo in sala era paragonabile a quello dello stadio di calcio.

Nonostante i limiti ricordati dei proiettori, la qualità dell'immagine co-decodificata è risultata ottima, secondo le aspettative, e corrispondente perfettamente alla qualità stimata attraverso simulazioni mediante calcolatore ed ai risultati di prove soggettive. Infatti l'unico modo per valutare le prestazioni dei codec è quello di ricorrere a prove soggettive, utilizzando speciali sequenze di prova, essendo le degradazioni legate al contenuto dell'immagine e quindi non misurabili con i sistemi tradizionali. Attualmente è molto difficile effettuare prove soggettive con segnali ad alta definizione a causa dei limiti tecnologici delle telecamere e dei display, che non consentono ancora una sufficiente risoluzione, per evidenziare gli eventuali difetti degli algoritmi previsti per trasferire un segnale della qualità HDTV. Per risolvere questo problema si effettuano le prove nello standard per la TV digitale convenzionale 4:2:2 considerando l'immagine come una «finestra» su un display più grande in HDTV. Poiché il display virtuale in HDTV avrebbe un'altezza doppia del display reale in 4:2:2, effettuando le prove ad una distanza di sei volte l'altezza dello schermo si ottengono risultati equivalenti ad un'osservazione in HDTV ad una distanza di tre volte l'altezza, il che corrisponde esattamente alle procedure raccomandate dal CCIR per la valutazione delle immagini in HDTV. In figura 4 sono riportati i risultati di prove soggettive effettuate presso il *Centro Ricerche* RAI che, come si è detto, corrispondono perfettamente a quanto osservato durante l'esperimento Italia '90.

(1): È stato effettuato anche un esperimento di ricezione al *Centro Ricerche* RAI, utilizzando un'antenna da 70 cm. L'esperimento, avvenuto a cielo sereno, non ha evidenziato alcuna degradazione nella qualità ed affidabilità del segnale ricevuto.

ITALIA '90: PRIMA MONDIALE DI COLLEGAMENTO NUMERICO IN HDTV VIA SATELLITE

Fig. 3 — Schema della disposizione del pubblico a cui si è fatto riferimento per l'allestimento delle sale visione.

Per quanto concerne le prestazioni del canale via satellite per la trasmissione del segnale numerico HDTV si è riscontrata una sostanziale corrispondenza con i risultati ottenuti, durante la fase preparatoria, tramite accurate simulazioni al calcolatore e misure di laboratorio su un simulatore «hardware» del canale Olympus appositamente realizzato presso il *Centro Ricerche* RAI.

L'unica causa di degradazione, rispetto alla trasmissione su canale ideale, era imputabile, come previsto, alla limitata larghezza di banda del canale Olympus (circa 42 MHz). Tale degradazione, quantizzabile in termini di peggioramento del rapporto portante-rumore (C/N), per un assegnato tasso d'errore, è risultata di circa 2 dB, in un buon accordo con le simulazioni e le prove sperimentali. Ciò non ha comunque sostanzialmente penalizzato i margini di corretta ricezione del segnale, risultati normalmente superiori a 10 dB.

Un'analisi più dettagliata delle prestazioni del collegamento via satellite è riportata in bibliografia 1.

6. Applicazioni del sistema di trasmissione

Il codec HDTV impiegato negli esperimenti di Italia '90 è caratterizzato dall'elevato grado di flessibilità che costituisce una delle prerogative dei sistemi numerici e pertanto si adatta a vari formati di scansione e può operare con una gamma relativamente vasta di velocità di trasmissione. Ciò rende possibile l'utilizzo del sistema in un certo numero di applicazioni nel campo dei collegamenti via satellite (bibl. 2):

- scambio di materiali HDTV di elevata qualità tra Centri di Produzione;
- trasmissione da unità di ripresa esterna verso i Centri di Produzione (satellite news gahtering);

Fig. 4 — Risultati di un'indagine soggettiva per la valutazione dei segnali codificati a 34 Mbit/s e 17 Mbit/s, confrontati con l'originale 4:2:2. Si è utilizzato il metodo CCIR doppio stimolo. Le differenze sono state calcolate su base centesimale. Gli osservatori erano disposti ad una distanza pari a 6 volte l'altezza dello schermo, corrispondente a 3 volte, se riferita al caso HDTV.

— trasmissione in diretta di avvenimenti di attualità a utenti selezionati;
— trasmissione di programmi HDTV verso le stazioni di testa di reti di distribuzione in fibra ottica.

Per ciascuna delle suddette applicazioni si richiede uno studio accurato dei requisiti specifici; l'esperienza acquisita durante gli esperimenti di Italia '90 costituisce una base per successive ottimizzazioni del sistema di trasmissione.

L'introduzione di un servizio regolare di diffusione diretta da satellite dell'HDTV all'utente, avverrà secondo modi e tempi dettati principalmente da fattori di mercato legati alla disponibilità dei ricevitori domestici. Per impiego sui canali da satellite a «banda stretta» nella banda di 12 GHz pianificata dalla WARC '77, è allo studio in Europa il sistema HD-MAC. Per quanto riguarda l'eventuale assegnazione per l'HDTV da parte della WARC '92 di una nuova banda, intorno ai 20 GHz, da pianificare con canali a «banda larga» si prevede l'utilizzazione di sistemi completamente numerici, in grado di fornire all'utente una qualità potenzialmente trasparente a quella di studio. I vantaggi offerti dall'HDTV in termini, sia di qualità intrinseca che di processabilità, stanno promuovendo una vasta gamma di interessanti applicazioni di tipo «non broadcast» che potranno presumibilmente essere introdotte prima dell'avvio di un regolare servizio di radiodiffusione all'utente domestico.

Nella maggior parte dei casi, la disponibilità di uno strumento che consenta il trasporto a distanza dei segnali è un requisito determinante per la realizzazione del sistema; tra le applicazioni più significative dell'HDTV in settori «non broadcast» si possono individuare le seguenti:

— applicazioni in campo didattico (insegnamento da postazioni remote);
— pubblicità (programmi di tipo commerciale, cataloghi audiovisivi, sale visioni, teleacquisto);
— applicazioni biomedicali (telemedicina, telediagnostica);
— applicazioni militari;
— videoconferenza ad elevata qualità;
— distribuzione elettronica di film nelle sale cinematografiche;
— punti di visione nei servizi pubblici (stazioni ferroviarie, aeroporti, mostre, conferenze);
— telesorveglianza per usi industriali;
— grafica elettronica e cartellonistica.

Alcune tra le applicazioni sopraelencate sono già in avanzato stato di sviluppo (bibl. 3) non essendo, generalmente, sottoposte a vincoli derivanti dal perdurare del dibattito internazionale sugli standard di scansione per l'HDTV. Se si considera il grado di maturazione tecnologica degli attuali apparati di ripresa e degli attuali display, il sistema di trasmissione dimostrato a Italia '90 rappresenta una valida e versatile risposta alle esigenze di trasporto dei segnali HDTV derivante dall'introduzione dei vari servizi.

7. Conclusioni

Gli esperimenti effettuati dalla RAI durante i campionati mondiali di calcio (Italia '90) hanno dimostrato la fattibilità tecnica e operativa di un sistema di trasmissione totalmente numerico di programmi HDTV di elevata qualità. Le installazioni sviluppate per l'occasione comprendevano tratte in fibra ottica, 2 stazioni trasmittenti via satellite di cui una fissa e una mobile, un collegamento via satellite e un certo numero di piccoli impianti di distribuzione, nelle postazioni riceventi, per alimentare le sale visione equipaggiate con grandi schermi.

Durante gli oltre 40 giorni della manifestazione sono state trasmesse 16 partite in diretta HDTV più alcune repliche; circa 700 persone distribuite in otto sale di visione, distribuite sul territorio nazionale, hanno potuto assistere a ciascuna trasmissione.

Gli esperimenti di trasmissione numerica sono stati resi possibili grazie alla disponibilità del codificatore HDTV sviluppato nel quadro del progetto Eureka EU 256.

In base ai risultati degli esperimenti si possono trarre le seguenti conclusioni:

— la qualità globale delle immagini ricevute, valutata sui monitori HDTV di caratteristiche professionali, è stata giudicata paragonabile a quella esistente in uscita dalle telecamere;
— le prestazioni della catena di trasmissione, in termini di robustezza nei confronti degli errori di trasmissione e di margini di ricezione, sono risultate superiori alle aspettative, anche in condizione di propagazione alquanto sfavorevoli.

Il sistema di trasmissione sperimentato ad Italia '90 si è dimostrato uno strumento adeguato ed efficace per il trasporto a lunga distanza di segnali HDTV di elevata qualità.

Il risultati ottenuti costituiscono un significativo passo avanti nello sviluppo della HDTV. Infatti, la trasmissione punto-punto rappresenta una delle strozzature che occorre eliminare per rendere totalmente operativo un sistema di produzione. Inoltre, la disponibilità di un sistema di trasmissione totalmente numerico, quindi idoneo ad essere impiegato sia su reti in fibra ottica, che su canali da satellite, apre la strada allo sviluppo di una molteplicità di applicazioni industriali e commerciali, nelle quali possono venire sfruttate pienamente la peculiarità intrinseche dell'Alta Definizione.

(3927)

BIBLIOGRAFIA

1. - M. Cominetti, A. Morello: *Italia '90: Trasmissioni punto-multipunto di HDTV via satellite.* «Elettronica e Telecomunicazioni», in questo numero.

2. - M. Cominetti: *Perspectives and evolution of HDTV by satellite.* Workshop on HDTV, Torino, September 1989.

3. - G.F. Barbieri, M. Cominetti: *Experiments of point-to-multipoint digital transmission of HDTV via satellite during the football Worldcup 1990 in Italy.* 132° SMPTE Technical Conference, New York (USA), October 1990.

4. - M. Barbero, S. Cucchi, R. Del Pero, G. Dimino, M. Occhiena, M. Muratori, M. Stroppiana: *Italia '90: Codifica del segnale televisivo numerico.* «Elettronica e Telecomunicazioni», in questo numero.

ITALIA '90: TRASMISSIONE NUMERICA PUNTO-MULTIPUNTO VIA SATELLITE DI SEGNALI HDTV

M. COMINETTI, A. MORELLO*

SOMMARIO — Si esaminano le problematiche tecniche relative alla sperimentazione di trasmissione numerica punto-multipunto via satellite di segnali HDTV a 70 Mbit/s effettuata dalla RAI in occasione della Coppa del Mondo di calcio 1990 in Italia. Particolare attenzione è rivolta alla intensa attività svolta dal Centro Ricerche nella fase preparatoria della sperimentazione per identificare i parametri tecnici del sistema: bit-rate, tipo di modulazione, scelta del satellite, caratteristiche delle stazioni trasmittenti e delle installazioni riceventi. Si riportano quindi i risultati conseguiti nella sperimentazione tecnica ad Italia '90 che hanno sostanzialmente dimostrato l'affidabilità e le elevate prestazioni del sistema a 70 Mbit/s per il trasporto a lunga distanza di segnali HDTV di elevata qualità su canali da satellite e collegamenti in fibra ottica. Si indicano le possibilità di miglioramento delle prestazioni del sistema introducendo la compensazione del movimento nei codec HDTV ed impiegando sistemi avanzati di modulazione e codifica di canale con decodifica di Viterbi, attualmente in fase di sviluppo. I risultati conseguiti nella sperimentazione in Italia '90 consentiranno alla RAI di contribuire fattivamente all'attività di studio e normalizzazione nel campo dell'HDTV da satellite, sia in ambito nazionale (attraverso il Progetto Finalizzato Telecomunicazioni del CNR) che internazionale (CCIR, UER, EU-95 fase II).

SUMMARY — ***Point-to-multipoint digital transmission via satellite of HDTV signals*** *- The technical problems relevant to the experiments of point-to-multipoint digital transmission at 70 Mbit/s via satellite of HDTV signals carried-out by the RAI a the Foot-ball WorldCup in Italy (Italia '90) are discussed. Particular attention is paid to the activity of the RAI Research Centechnical parameters of the digital HDTV system: bit-rate, modulation, choice of the satellite, characteristics of the transmitting earth stations and for the receiving installations. The paper then reports on the results of the experiments at Italia '90 which have shown the high reliability and performance of the system for the long distance transport at 70 Mbit/s of high quality HDTV material over digital satellite and optical fibre links. The possibility of further system improvement, by introducing motion compensation in the HDTV codec and by using advanced channel coding-modulation techniques based on Viterbi decoding, are prsented. The significant results achieved by the Italia '90 experiments will allow the RAI to positively contribute in the development of satellite HDTV, both in the national and internazional contexts (CNR/PFT, CCIR, EBU, EU-95/PG04, etc.).*

1. Introduzione

La Coppa del Mondo di calcio giocata in Italia (8 giugno - 8 luglio 1990) ha dato alla RAI l'opportunità di sperimentare, in anteprima mondiale, un sistema di trasmissione numerica punto-multipunto via satellite di segnali HDTV ad elevata qualità.

La sperimentazione è stata concepita, ideata e coordinata dal *Centro Ricerche* RAI. Lo studio sistemistico è iniziato nel 1988 sotto la guida dell'allora Direttore ing. Rolando Salvadorini, quando fu possibile dimostrare in simulazione, a coronamento di una importante attività di ricerca nel campo della codifica di sorgente, l'elevata qualità delle immagini HDTV ottenibili, con 50-60 Mbit/s assegnati al video, mediante algoritmo di riduzione di ridondanza basato sulla trasformata coseno discreta (DCT). Tale algoritmo di codifica, con l'aggiunta di 2 Mbit/s per la trasmissione dell'audio (5 o 6 canali di qualità) e circa 8 Mbit/s per la correzione degli errori e le informazioni di sincronismo di trama, consentiva di sviluppare un sistema di HDTV numerico con bit-rate lordo di 60-70 Mbit/s, potenzialmente in grado di essere utilizzato per trasmissioni sperimentali su canali da satellite.

La disponibilità dei codec HDTV a 70 Mbit/s, sviluppati in ambito al progetto europeo EU-256 e costruiti dalla Telettra in una decina di esemplari, e la possibilità di accesso diretto al canale 24 sul satellite Olympus da parte della RAI hanno costituito gli elementi chiave del successo della sperimentazione.

Si descrivono nel seguito le varie fasi della complessa attività di ricerca e sperimentazione effettuata dal *Centro Ricerche* RAI in vista di Italia '90, con particolare attenzione alla valutazione delle prestazioni del collegamento numerico via satellite effettuata tramite simulazioni al calcolatore, prove su un simulatore hardware del satellite, appositamente sviluppato presso il *Centro Ricerche*, e con prove preliminari di trasmissione via Olympus.

Si commentano infine i soddisfacenti risultati conseguiti ad Italia '90 esaminando separatamente le prestazioni delle varie unità componenti l'intera catena di trasmissione.

* Dr. Mario Cominetti, Ing. Alberto Morello del Centro Ricerche RAI (Torino).
Dattiloscritto pervenuto alla redazione il 30 ottobre 1990.

2. La fase preparatoria

I primi studi sulle problematiche di trasmissione, in vista della dimostrazione di HDTV numerica ad Italia '90, miravano ad identificare le caratteristiche del canale trasmissivo per satelliti di diffusione diretta, quali l'Olympus, e per satelliti di comunicazione, quali Eutelsat I, e a sviluppare un modello di simulazione al calcolatore (bibl. 1). Si effettuavano quindi le valutazioni per individuare il massimo bit-rate trasmissibile con modulazioni convenzionali tipo QPSK, Offset-QPSK e 8-PSK, per individuare i livelli di interferenza sui canali adiacenti ed i diametri di antenna richiesti per una corretta ricezione del segnale numerico, con adeguati margini anche in condizioni di propagazione sfavorevoli. Per verificare su base sperimentale i risultati ottenuti al calcolatore veniva realizzato un simulatore hardware del canale da satellite, equipaggiato con filtri di entrata (IMUX) ed uscita (OMUX) riproducenti sia quelli dell'Olympus che di Eutelsat I, e con amplificatore di potenza (TWTA) da 50 watt operante nelle bande DBS e KU. Nell'aprile 1989 venivano provati sul simulatore i prototipi a 70 Mbit/s di un modem QPSK e di un modem 8-PSK. Parallelamente veniva avviata da parte della Selenia Spazio (su specifiche definite dal *Centro Ricerche*) la costruzione di una stazione trasmittente trasportabile per il satellite Olympus, con caratteristiche di banda passante e di linearità adatte alle trasmissioni numeriche. Si provvedeva inoltre all'adattamento al numerico della stazione fissa trasmittente installata presso il Centro di produzione RAI-TV di Roma, originariamente progettata per operare esclusivamente con segnali televisivi analogici MF.

Nell'estate del 1989 veniva lanciato il satellite Olympus e nel novembre dello stesso anno venivano effettuate con successo le prime prove di trasmissione numerica via Olympus con segnali pseudo-casuali a 70 Mbit/s in QPSK dalla stazione fissa di Roma. I risultati di queste prove confermavano largamente quelli ottenuti con simulazioni al calcolatore e con prove di laboratorio.

Sulla base dei risultati di bilanci di collegamento l'ipotesi di utilizzare il satellite Eutelsat-I per le trasmissioni HDTV a 70 Mbit/s non sembrava proponibile a causa della bassa potenza irradiata dal satellite che avrebbe richiesto di operare con antenne riceventi molto grandi (in certi casi con puntamento automatico), specialmente nelle intallazioni a sud di Roma, e comunque con scarsi margini di ricezione (vedi par. 3.5). Si sarebbe inoltre dovuto provvedere all'affitto presso Eutelsat di uno o due ripetitori per tutto il periodo della sperimentazione, esigenza particolarmente difficile da soddisfare data la scarsa disponibilità di ripetitori da satellite ad Italia '90. L'ipotesi di utilizzare l'Olympus prendeva quindi via via più consistenza.

Nella primavera del 1990 veniva presentato all'UER a Torino ed al NAB '90 ad Atlanta (USA) il primo prototipo del codec HDTV a 70 Mbit/s sviluppato dalla Telettra nell'ambito del progetto europeo EU-256. La disponibilità di una decina di esemplari del codec, appositamente costruiti dalla Telettra, ha quindi consentito al *Centro Ricerche* RAI di completare entro i termini previsti l'allestimento della intera catena di trasmissione e distribuzione del segnale via satellite e realizzare la sperimentazione di HDTV ad Italia '90.

3. Prestazioni del collegamento via satellite

Un elemento determinante nel successo delle dimostrazioni di HDTV ad Italia '90 è stata certamente l'elevata qualità del collegamento numerico via satellite Olympus ottenuta tramite una rigorosa ottimizzazione delle prestazioni delle singole componenti la catena. In particolare si sono studiati i vari aspetti tecnici che maggiormente potevano influire sulle prestazioni del collegamento:

— tecniche di correzione di errore;
— canale trasmissivo via satellite;
— modulazione numerica;
— problemi interferenziali;
— influenza della propagazione;
— stazioni trasmittenti di terra (fissa e trasportabile);
— sistemi riceventi.

3.1 Correzione degli errori di trasmissione

I codec HDTV impiegati ad Italia '90 utilizzano un codice correttore di tipo BCH(255,239) interlacciato, in grado di correggere errori sigoli e doppi su un blocco di 255 bit. L'interlacciamento (di ordine 16) permette la correzione di errori a pacchetti, fino a un massimo di 32 errori consecutivi). Con tale sistema di correzione l'immagine HDTV non presenta degradamenti fino a un tasso di errore (BER) sul canale di 10^{-6}, a cui corrisponde un BER di circa 10^{-10} dopo correzione. Un BER di 10^{-5} produce un degradamento leggermente disturbante. Il valore di 10^{-6} è stato quindi scelto come riferimento nel dimensionamento dell'intero sistema di trasmissione. Altri codici a blocco, più sofisticati, avrebbero potuto garantire prestazioni migliori: ad esempio il codice di Reed-Solomon (255,239), attualmente in avanzata fase di implementazione nei codec HDTV della seconda generazione, permette un guadagno di oltre 1 dB rispetto al codice BCH nel caso di errori statisticamente indipendenti e consente inoltre di correggere più efficacemente gli errori a pacchetti (fino ad un massimo di 128 bit errati consecutivi).

3.2 Il canale trasmissivo

In figura 1 è riportato lo schema a blocchi della catena di trasmissione HDTV via satellite assunta come riferimento nella fase di studio. Nella stazione di terra il segnale HDTV in uscita dal codificatore su due flussi da 34,368 Mbit/s, viene modulato (in QPSK od 8-PSK) alla frequenza intermedia di 140 MHz, convertito alla frequenza della tratta in salita (rispettivamente a 14 GHz e a 18 GHz per i satelliti Eutelsat-I e per Olympus), amplificato e trasmesso verso il satellite. Per ridurre le interferenze sulla tratta in salita e le distorsioni del segnale, l'amplificatore di potenza (HPA a Klystron) della stazione di terra deve operare a potenza ridotta (almeno 3 dB al di sotto della potenza massima) in regime cioè di quasi-linearità. In queste condizioni si dice che l'HPA opera con un OBO (Output Back Off) di 3 dB.

Il ripetitore del satellite include un ricevitore a basso rumore (LNA), un convertitore di frequenza, un filtro di canale di ingresso (IMUX) necessario per ridurre il rumore sulla tratta in salita, un amplificatore di potenza ad onde

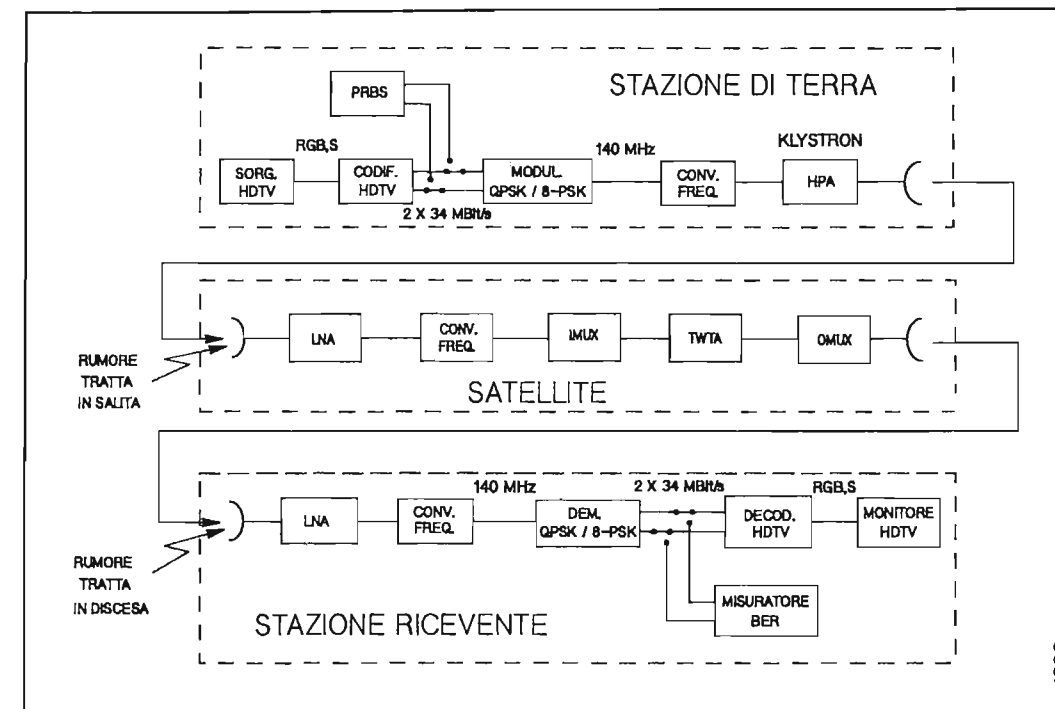



Fig. 1 — Schema a blocchi del canale di trasmissione via satellite.

progressive (TWTA) e un filtro di canale di uscita (OMUX) per ridurre le interferenze sulla tratta in discesa. Normalmente l'amplificatore di bordo viene utilizzato alla saturazione, e quindi in condizioni di forte nonlinearità, per sfruttare appieno la potenza disponibile e migliorare il rendimento energetico. Ciò determina un allargamento dello spettro del segnale numerico irradiato con sensibile risalita dei lobi secondari, analogamente a quanto si può vedere in figura 6 che si riferisce ad un segnale QPSK a 70 Mbit/s all'uscita dell'amplificatore di potenza della stazione trasmittente fissa di Roma.

Il sistema ricevente è composto dall'antenna, da un amplificatore a basso rumore, un convertitore di frequenza e un demodulatore coerente (QPSK o 8-PSK). Il decodificatore HDTV riceve i due flussi numerici a 34,368 Mbit/s in uscita dal demodulatore, li sincronizza recuperando eventuali ritardi di uno rispetto all'altro e ricostruisce i segnali analogici (R-G-B e sincronismi video) per la visualizzazione su monitore o su grande schermo.

Le distorsioni lineari di ampiezza/frequenza e ritardo di gruppo/frequenza della catena trasmissiva generano interferenza intersimbolica sul segnale numerico che si traduce in un peggioramento del tasso di errore del sistema. Come regola molto approssimata le distorsioni che danno maggior contributo sono quelle relative alla banda di Nyquist del segnale modulato. Tale banda è pari a R/2 = 35 MHz ed R/3 = 23,3 MHz, rispettivamente per le modulazioni QPSK e 8-PSK, essendo R = 70 Mbit/s la velocità di trasmissione. Per la modulazione QPSK le variazioni nella risposta ampiezza/frequenza dovrebbero essere contenute entro 0,5 dB e quelle di ritardo di gruppo dovrebbero essere minori di 1/3 del periodo di simbolo Ts (Ts = 28 ns a 70 Mbit/s).

La risposta globale in frequenza (ampiezza e ritardo di gruppo) del canale Olympus (Fig. 2a) è essenzialmente determinata dal filtro di ingresso del satellite, con banda a − 3 dB di circa 42 MHz. Il filtro di uscita è a banda lar-

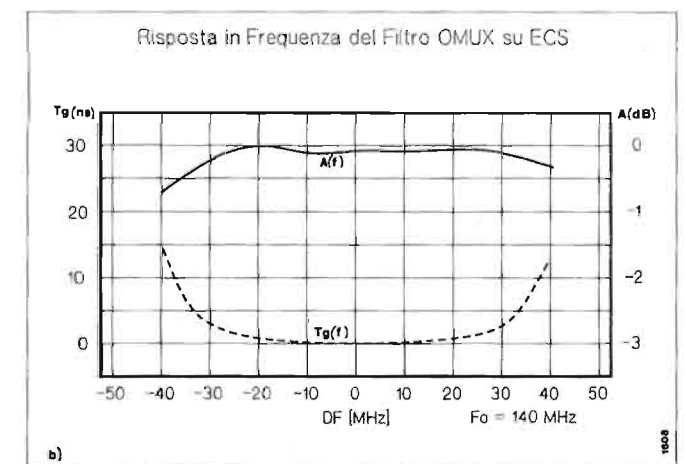
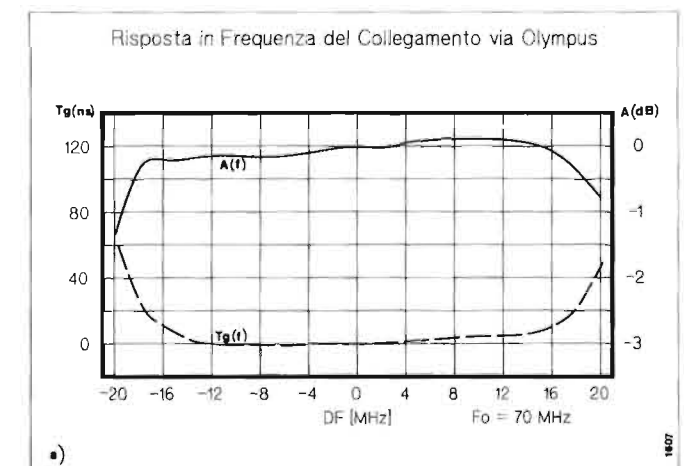



Fig. 2 — Risposta in frequenza del canale di trasmissione *a*) via satellite Olympus e *b*) via satellite EUTELSAT I.
A(f) = ampiezza / frequenza.
Tg(f) = ritardo di gruppo / frequenza

ga e non protegge quindi i canali adiacenti dalle possibili interferenze introdotte dal segnale numerico il cui spettro, come si è detto, subisce un indesiderato allargamento a causa della non linearità del TWTA. Le caratteristiche del TWTA dell'Olympus (AM/AM e AM/PM) sono riportate in figura 3. Si riscontra un valore massimo del fattore di conversione AM/PM di circa 6°/dB. La stazione trasmittente di terra contribuisce con una distorsione di ampiezza di circa 0,5 dB e di ritardo di gruppo di circa 7 ns a ±20 MHz dalla frequenza centrale del canale.

In figura 2b sono riportate le curve tipiche ampiezza/frequenza e ritardo di gruppo/frequenza del filtro di canale d'uscita dei ripetitori di Eutelsat-I. I filtri d'ingresso hanno una risposta in frequenza molto simile. Considerando gli effetti dei due filtri cumulativi, la banda utilizzabile con basse distorsioni risulta di circa 72 MHz. La banda passante a − 3 dB è di circa 80 MHz. Le caratteristiche AM/AM e AM/PM degli amplificatori di potenza (TWTA) di bordo sono simili a quelle dell'Olympus, anche se la potenza è sensibilmente inferiore (20 watt contro 180 watt).

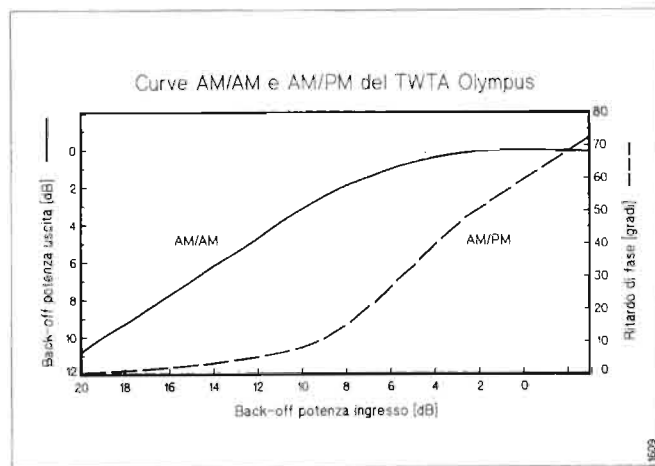



Fig. 3 — Caratteristiche di non linearità dell'amplificatore di potenza (TWTA) a bordo del satellite Olympus (payload DDS, canale 24). AM/AM = potenza in uscita in funzione della potenza in entrata AM/PM = variazione di fase del segnale in uscita in funzione della potenza in entrata

3.3 Prestazioni delle modulazioni PSK via Olympus

3.3.1 *Curve Bit-rate; E_b/N_o; tasso d'errore (BER)*

Sul canale Olympus, simulato su calcolatore, sono state valutate le prestazioni delle modulazioni QPSK, Offset-QPSK ed 8-PSK ricavando le curve di tasso di errore (BER) in funzione del rapporto portante-rumore E_b/N_o (essendo E_b l'energia per bit ed $N_o/2$ la densità spettrale di potenza del rumore). Si ricorda che dal rapporto E_b/N_o si passa direttamente al rapporto C/N (in 27 MHz) tramite la relazione:

$$C/N\ (dB)_{in\ 27\ MHz} = E_b/N_o\ (dB) + 10\ Log\ R\ (Mbit/s)/27$$

Il rapporto C/N viene normalmente valutato in 27 MHz che è la larghezza di banda normalizzata dalla WARC '77 per i ricevitori analogici TV-MF.

L'Offset-QPSK è una variante del QPSK che presenta minori variazioni di ampiezza del segnale a scapito però di una efficienza spettrale leggermente inferiore.

In figura 4 sono riportati i valori di E_b/N_o richiesti sul canale Olympus per un BER = 10^{-4} in funzione del bit-rate trasmesso: la modulazione QPSK presenta prestazioni lievemente migliori dell'Offset-QPSK, e può operare senza sensibile degradamento fino a un bit-rate di 60 Mbit/s, mentre a 70 Mbit/s si riscontra un degradamento addizionale di circa 1,2 dB dovuto essenzialmente alle distorsioni lineari del filtro IMUX. Con l'8-PSK, per ottenere lo stesso tasso di errore si richiede un valore di E_b/N_o maggiore di circa 5 dB, ma è possibile utilizzare bit-rate di 80-90 Mbit/s.

Dai risultati delle simulazioni e dalle prove di laboratorio sui modem disponibili si è deciso di utilizzare la modulazione QPSK, per la sua robustezza alle distorsioni e al rumore e per la maggior affidabilità dei modem disponibili. Il bit-rate scelto è stato di 70 Mbit/s (a livello di modem), il massimo consentito da Olympus con distorsioni ragionevoli, suddiviso in due flussi indipendenti con bit-rate standard di 34,368 Mbit/s forniti dai codec HDTV. Questa scelta consente di ottenere un'ottima qualità delle immagini HDTV co-decodificate, favorisce l'utilizzo di una vasta gamma di dispositivi già esistenti (multiplatori, trasmettitori e ricevitori per fibra ottica) e consente l'accesso alle reti numeriche di terra su due canali a 34 Mbit/s.

In figura 5a sono riportate le curve di BER in funzione di E_b/N_o ottenute al calcolatore, con prove di laboratorio sul simulatore del satellite e nelle trasmissioni via Olympus a 70 Mbit/s in QPSK attraverso la stazione trasmittente di Roma. Come si vede dalla curva D relativa alle misure via Olympus per ottenere un tasso di errore di 10^{-6} (immagini HDTV non degradate da errori) è richiesto un valore di E_b/N_o di circa 15 dB, a cui corrisponde un rapporto C/N (in 27 MHz) di circa 19 dB. Durante le prove la stazione trasmittente di terra operava in condizioni quasi-lineari al di sotto della potenza massima (con OBO > 3 dB) per non degradare il segnale numerico.

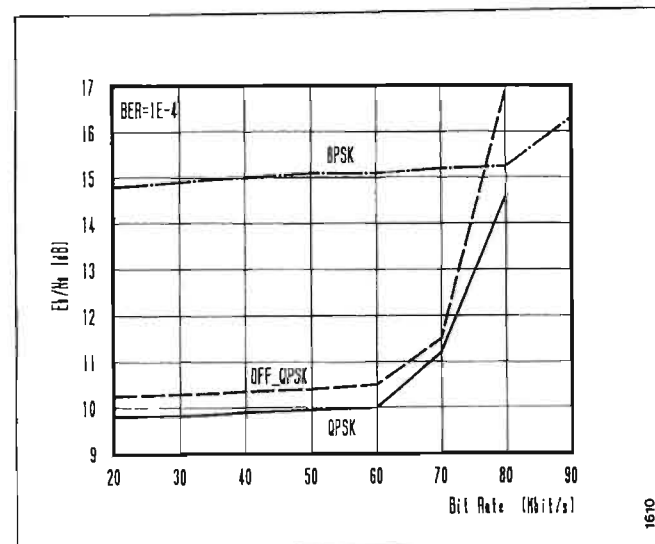



Fig. 4 — Prestazioni delle modulazioni numeriche QPSK, Offset-QPSK ed 8-PSK sul canale di trasmissione via Olympus simulato al calcolatore: Rapporto E_b/N_o richiesto per un tasso di errore (BER) = 10^{-4} in funzione del bit-rate (Mbit/s).

Fig. 5a — A: QPSK ideale; B: simulazioni al calcolatore; C: 70 Mbit/s su simulatore di satellite; D: 70 Mbit/s via Olympus (can. 24)

Fig. 5b — A: QPSK ideale; B: 70 Mbit/s su simulatore di satellite; C: 34 Mbit/s su satellite EUTELSAT I; D: 70 Mbit/s su satellite EUTELSAT I

Fig. 5 — Trasmissione a 70 Mbit/s in QPSK *a)* su satellite Olympus e *b)* su satellite EUTELSAT I: tasso di errore (BER) in funzione del rapporto C/N in 27 MHz.

3.3.2 *Riduzione delle interferenze*

La trasmissione di segnali numerici ad elevato bit-rate via Olympus nella banda dei 12 GHz richiede di rispettare precisi vincoli sulle interferenze verso i canali adiacenti stabiliti dalla WARC '77 per il down-link e dall'ORB '88 per l'up-link. In figura 6 sono riportati gli spettri del segnale QPSK a 70 Mbit/s all'uscita della stazione trasmittente di Roma al variare del back-off (OBO) dell'amplificatore a Klystron e sono messe in evidenza le posizioni dei canali adiacenti (AC) a 19,18 MHz (1° AC, interferito dal primo lobo dello spettro QPSK) e a 38,36 MHz (2ª AC, interferito parzialmente dal primo e dal secondo lobo dello spettro). La pianificazione, definita per segnali TV analogici a modulazione di frequenza (MF), prevede i seguenti rapporti di protezione (rapporti fra la potenza del segnale utile e la somma delle potenze dei canali interferenti):

- cocanale: 40 dB (up-link) e 31 dB (down-link)
- canali adiacenti: 21 dB (up-link) e 15 dB (down-link)

Non sono previsti margini di protezione verso i canali a distanza di ± 38,36 MHz (2° AC). Questi canali possono venire invece interferiti da segnali numerici ad elevato bit-rate a causa dell'allargamento dello spettro. Utilizzando i rapporti di protezione sopra indicati, un determinato segnale (analogico o numerico) è considerato compatibile con la pianificazione quando il suo contributo interferenziale nei confronti di un segnale analogico MF è sotto la soglia di visibilità.

Mediante prove di laboratorio (bibl. 2) è stato possibile verificare che le interferenze di un segnale numerico QPSK od 8-PSK su un segnale analogico MF (PAL o MAC) danno origine a un degradamento soggettivo di qualità video simile a quello prodotto da un rumore gaussiano di pari potenza (misurata nel filtro di ricezione da 27 MHz del segnale PAL o MAC interferito). Tale degradamento è molto meno fastidioso di quello prodotto dai segnali video analogici MF di pari potenza che si manifesta in genere sotto forma di battimenti. La soglia di visibilità delle interferenze di un segnale numerico sui segnali TV analogici MF viene raggiunta per valori di C/I (C = potenza del segnale utile, I = potenza del segnale interferente misurata in 27 MHz) dell'ordine di 19 ÷ 21 dB per segnali MAC e di 22 ÷ 24 dB per segnali PAL.

Dati gli elevati rapporti di protezione co-canale previsti dalla pianificazione, le interferenze co-canale da parte di segnali numerici possono quindi essere trascurate.

Per quanto riguarda la *tratta in salita*, con valori di Eirp da terra di 80 dbW (a cui corrisponde un OBO > 5 dB per le stazioni trasmittenti di Italia '90) si sono stimati valori di C/I di circa 30 dB sul primo canale adiacente (a ± 19,18 MHz) e di circa 27 dB sul secondo canale adiacente (a ± 38,36 MHz), molto inferiori quindi alla soglia di visibilità delle interferenze sul MAC e sul PAL. È opportuno rilevare che durante la sperimentazione di Italia '90 i primi canali adiacenti sulla tratta in salita non erano occupati, mentre i secondi adiacenti erano occupati dai programmi in D2-MAC del satellite tedesco TVSAT-2.

Per quanto riguarda la *tratta in discesa*, i valori di C/I stimati sui canali adiacenti sono meno favorevoli rispetto

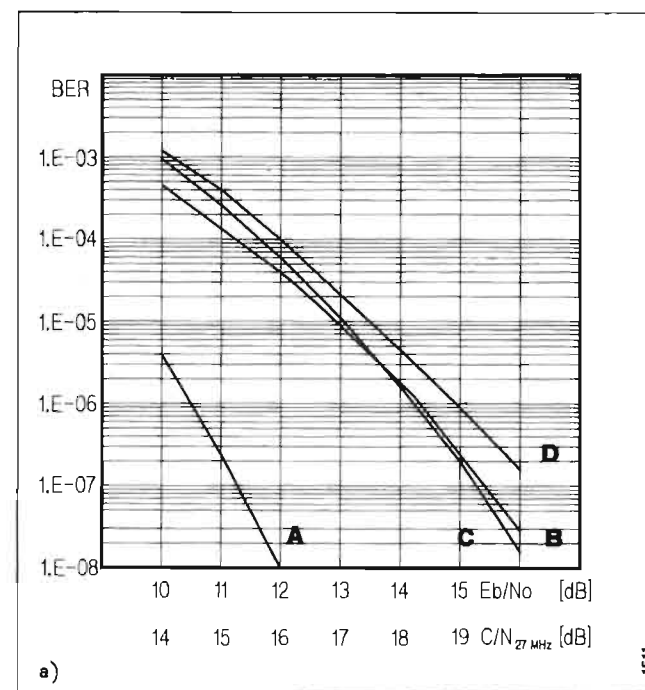
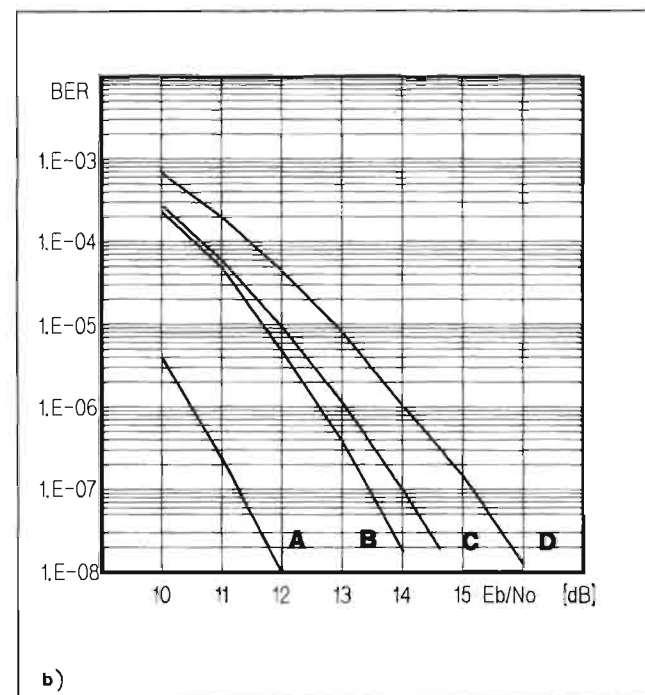
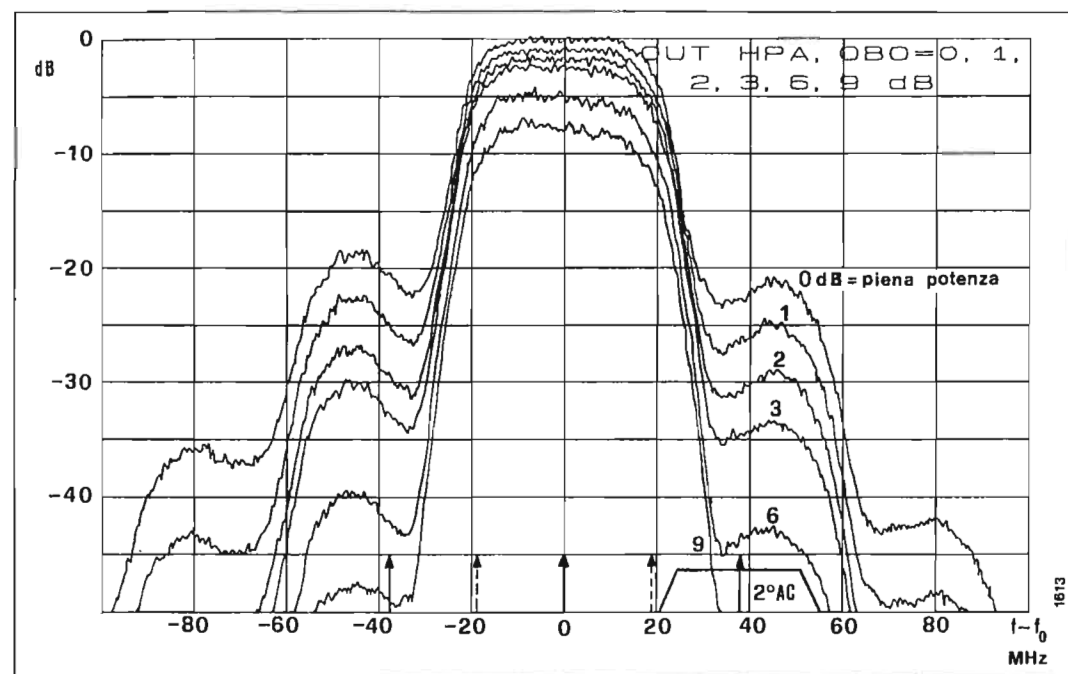



Fig. 6 — Spettro di potenza del segnale QPSK a 70 Mbit/s rilevato all'uscita della stazione trasmittente di Roma per vari valori della potenza irradiata. Con OBO = O dB si ha la potenza massima e con OBO = 1 ± 9 dB si hanno potenze ridotte.

alla tratta in salita, a causa della non-linearità dell'amplificatore di bordo (TWTA) dell'Olympus operante in saturazione, della elevata Eirp del satellite, inferiore di solo 1 dB rispetto ai 64 dBW previsti dalla WARC '77, e dei bassi rapporti di protezione previsti dal piano (15 dB per 1° AC, nessuna protezione per 2° AC). I valori stimati di C/I sono stati di 21 dB sul primo canale adiacente e di 18,5 dB sul secondo canale adiacente, quindi di poco al di sopra della soglia di visibilità per immagini MAC e PAL particolarmente critiche.

Come termine di confronto sono stati valutati con simulazioni al calcolatore i valori di C/I relativi al segnale C-MAC normalizzato dal CCIR (modulazione 2-4 PSK a 20,25 Mbit/s), con multiplex audio/dati a pieno canale, interferente su un segnale TV analogico MF nelle seguenti condizioni:

— TWTA del satellite operante in saturazione
— filtro d'uscita (OMUX) a banda larga
— Eirp massima prevista dalla WARC '77 (64 dB watt)

Si sono ottenuti valori di C/I di circa 21,5 dB sul 1° AC e di 26 dB sul 2° AC. Dunque, mentre sul primo canale adiacente si verifica circa lo stesso livello interferenziale di un segnale QPSK a 70 Mbit/s, sul secondo la situazione è molto migliore. Per ottenere con modulazione QPSK valori di C/I di 26-27 dB sul secondo canale adiacente è necessario ridurre il bit-rate a circa 50 ÷ 60 Mbit/s ed utilizzare filtri OMUX del tipo impiegato su TV-SAT (50 MHz di banda). Per soddisfare le maschere sullo spettro irradiato previste per il C-MAC (bibl. 3) qualora si trasmetta con segnali numerici in QPSK è necessario impiegare un bit-rate massimo di circa 45 Mbit/s.

Durante Italia '90 i canali adiacenti non erano occupati e quindi il problema interferenziale sulla tratta in discesa non si poneva. In caso contrario per trasmettere a 70 Mbit/s sarebbe stato necessario scegliere una modulazione a banda più stretta e ridurre leggermente la potenza irradiata dal satellite per far lavorare il TWTA in condizioni più lineari: ad esempio i rapporti C/I ottenibili su Olympus con modulazione 8-PSK a 70 Mbit/s (assumendo una riduzione di potenza del TWTA di circa 1 dB, senza filtro di canale in uscita) risultano di circa 24 dB (1° AC) e 27 dB (2° AC), migliori quindi di quelli ottenibili con il C-MAC. In queste condizioni di lavoro lo spettro dell'8-PSK a 70 Mbit/s all'uscita del satellite, contrariamente al QPSK alla stessa velocità, soddisfa pienamente la maschera definita per il C-MAC. Tuttavia, data la maggiore sensibilità al rumore, per ottenere un tasso di errore di 10^{-6} sul canale l'8-PSK a 70 Mbit/s si richiede un rapporto C/N di 23 dB, superiore quindi di 4 dB al valore di 19 dB richiesto dalla modulazione QPSK allo stesso bit-rate. Per soddisfare tale esigenza sarebbe necessario aumentare di circa il 60% il diametro delle antenne riceventi.

3.4 Prestazioni delle modulazioni PSK via Eutelsat I

I satelliti Eutelsat e Intelsat sono correntemente utilizzati per telefonia/dati con modulazioni numeriche QPSK a 120 Mbit/s con accesso a multiplazione di tempo (TDMA). Data la limitata potenza irradiata dai satelliti, le stazioni rice-trasmittenti di terra richiedono antenne di grosso diametro (almeno 8 metri).

Le prestazioni del QPSK e dell'8-PSK, in termini di BER in funzione di E_b/N_o, sono simili a quelle ottenibili su Olympus, ma la maggiore larghezza di banda del ripetitore (80 MHz contro 42 MHz) permette di aumentare il bit-rate di un fattore di circa 1,9.

In figura 5b sono riportate le curve di BER in funzione di E_b/N_o ottenute sul simulatore di satellite e con trasmissioni via EUTELSAT-I (F4) dalla stazione di up-link di Telespazio, al Fucino, nelle seguenti condizioni:

— modulazione QPSK a 34 a 70 Mbit/s
— trasmissione e ricezione con antenna da 8 metri
— Eirp da terra di 77,6 dBW (HPA operante in quasi-linearità, OBO = 10,4 dB)
— TWTA del satellite in saturazione (OBO = O dB)

Le curve sono state ottenute sommando rumore all'entrata del demodulatore QPSK. Mentre le prestazioni a 34 Mbit/s sono simili a quelle ottenute sul simulatore del satellite, quelle a 70 Mbit/s presentano un degradamento aggiuntivo di circa 1,5 dB (a BER = 10^{-6}), probabilmente imputabile alle distorsioni introdotte dal ricevitore (progettato per segnali TV/MF), e in parte recuperabile con un ricevitore ottimizzato per i segnali numerici. In ogni caso il valore di E_b/N_o richiesto per BER = 10^{-6} è compreso tra i 13 e i 14 dB (contro i 15 dB richiesti via Olympus) a cui corisponde un valore di C/N in 27 MHz di 17 ÷ 18 dB per trasmissioni HDTV a 70 Mbit/s in QPSK.

Per quanto riguarda le interferenze sulla tratta in salita, le misure effettuate indicano che per rispettare le maschere fissate da Eutelsat si deve far lavorare l'amplificatore a Klystron della stazione di terra con un OBO di almeno 2 ÷ 3 db.

3.5 Bilanci di collegamento e scelta del satellite

I bilanci di collegamento via Olympus e via Eutelsat (EUTELSAT I/F4), per il dimensionamento delle stazioni trasmittenti e riceventi, sono stati analizzati in dettaglio in (Bibl. 4 e 5). L'ipotesi di base era quella di utilizzare stazioni trasmittenti trasportabili per l'accesso diretto al satellite dagli stadi di Italia '90, in modo da evitare i costi e la complicazione operativa relativa al trasporto e alla distribuzione del segnale HDTV su reti numeriche di terra. Di seguito sono riportati i risultati principali di queste valutazioni che, nel caso dell'Olympus, tengono conto dei dati sul satellite forniti dall'ESA (G/T, Eirp, ecc.) dopo le prove in orbita.

3.5.1 *Satellite Olympus, canale 24*

Per la tratta in salita a 18 GHz, nell'ipotesi di utilizzare una stazione trasportabile da 85 dBW (Eirp massima), operante con una Eirp di circa 80 ÷ 82 dBW (OBO = 5 – 3 dB) per ridurre le distorsioni non-lineari sul segnale numerico e le interferenze sui canali adiacenti, il C/N in 27 MHz stimato è risultato di circa 25,3 ÷ 27,3 dB (statistica dell'attenuazione da pioggia al 99% del mese peggiore dell'anno, area di copertura a – 2 dB rispetto al centro del fascio Europeo, puntato tra l'Italia Settentrionale e la Svizzera).

Grazie ad un sofisticato sistema di controllo di guadagno il satellite opera con il TWTA alla saturazione per tutti i valori di Eirp di interesse sulla tratta in salita. Il C/N (in 27 MHz) sulla tratta in discesa stimato disponibile al 99% del mese peggiore è risultato di 26,6 dB con G/T della stazione ricevente di 20,7 dB/°K (diametro di antenna di 1,8 m, G = 44,7 dB, cifra di rumore dell'amplificatore a basso rumore NF = 1,7 dB).

Con i valori di C/N dedotti per le tratte in salita e in discesa il C/N totale disponibile è risultato di 22,9 ÷ 23,9 dB, a seconda della potenza irradiata dalla stazione trasmittente di terra, con un margine di 3,9 ÷ 4,9 dB rispetto ai 19 dB richiesti per il corretto funzionamento del sistema.

3.5.2 *Satellite EUTELSAT I/F4*

In condizioni operative a cielo chiaro si richiede una Eirp da terra di 77,6 dBW per ottenere la massima potenza all'uscita del satellite (TWTA alla saturazione). Per poter effettuare le trasmissioni da una stazione trasportabile, con antenna di diametro 3 ÷ 4 metri, è stato ipotizzato l'utilizzo del satellite con «gain setting» = 20, operante cioè nella condizione di massimo guadagno. Ciò permettere di far operare il TWTA di bordo a piena potenza con i valori di Eirp disponibili dalle stazioni di terra. Ottimizzando i parametri delle stazioni rice-trasmittenti (risposta in frequenza, rumore di fase dei convertitori, ecc.) si può stimare un valore di C/N (in 27 MHz) di circa 17 ÷ 18 dB per un tasso di errore sul canale di 10^{-6} (immagini HDTV non degradate da errori di trasmissione).

I bilanci di collegamento sono stati effettuati nelle seguenti ipotesi: tratta in salita in Eurobeam, trasmissione da Torino, ricezione nello spot Ovest (con centro sulla Manica), stazione trasportabile da 77 dBW di Eirp alla saturazione con antenna da 4 m equipaggiata di step-track (stazione non disponibile in RAI), cifra di rumore del ricevitore NF = 1,8 dB. Trasmettendo con 75 dBW (2 dB di output back-off per rispettare le maschere Eutelsat sulle interferenze) si ottiene un C/N (in 27 MHz) di circa 17 dB (ricezione a Roma) a cielo chiaro impiegando antenne riceventi da 4 m. In tali condizioni si verrebbe quindi ad operare al limite delle prestazioni del sistema numerico, senza margini di ricezione. Le condizioni di ricezione nell'Italia meridionale risultano sensibilmente più critiche e richiedono antenne riceventi di almeno 5 ÷ 6 m equipaggiate con puntamento automatico. Solo nell'Italia settentrionale sarebbe possibile operare con antenne riceventi di circa 3 m, seppure con scarsi margini di ricezione in cattive condizioni atmosferiche.

L'ipotesi di raggiungere le sale visione con due salti via satellite, il primo tra la stazione trasportabile e la stazione fissa di ricezione di Telespazio al Fucino (equipaggiata con una antenna da 8 metri), il secondo tra il Fucino e le sale visione, avrebbe permesso di operare con «gain setting» del satellite in posizione normale, ma con antenne riceventi di diametro non inferiore a 3 m al nord e con diametri assai maggiori al sud. Anche questa ipotesi è stata scartata, inoltre, per la difficoltà di disporre di due ripetitori dedicati su Eutelsat I. Un'altra seria difficoltà era dovuta alla mancanza di una stazione trasportabile adatta per segnali numerici a 70 Mbit/s QPSK ed in grado di operare con Eirp di almeno 77 dBW.

4. Risultati della sperimentazione tecnica ad Italia '90

Sulla base dei risultati della fase preparatoria, che evidenziavano i numerosi problemi relativi all'utilizzazione del satellite Eutelsat I, l'ipotesi di ricorrere all'Olympus diventava prioritaria, e si affermava definitivamente dopo il successo delle prove di trasmissione a 70 Mbit/s dal-

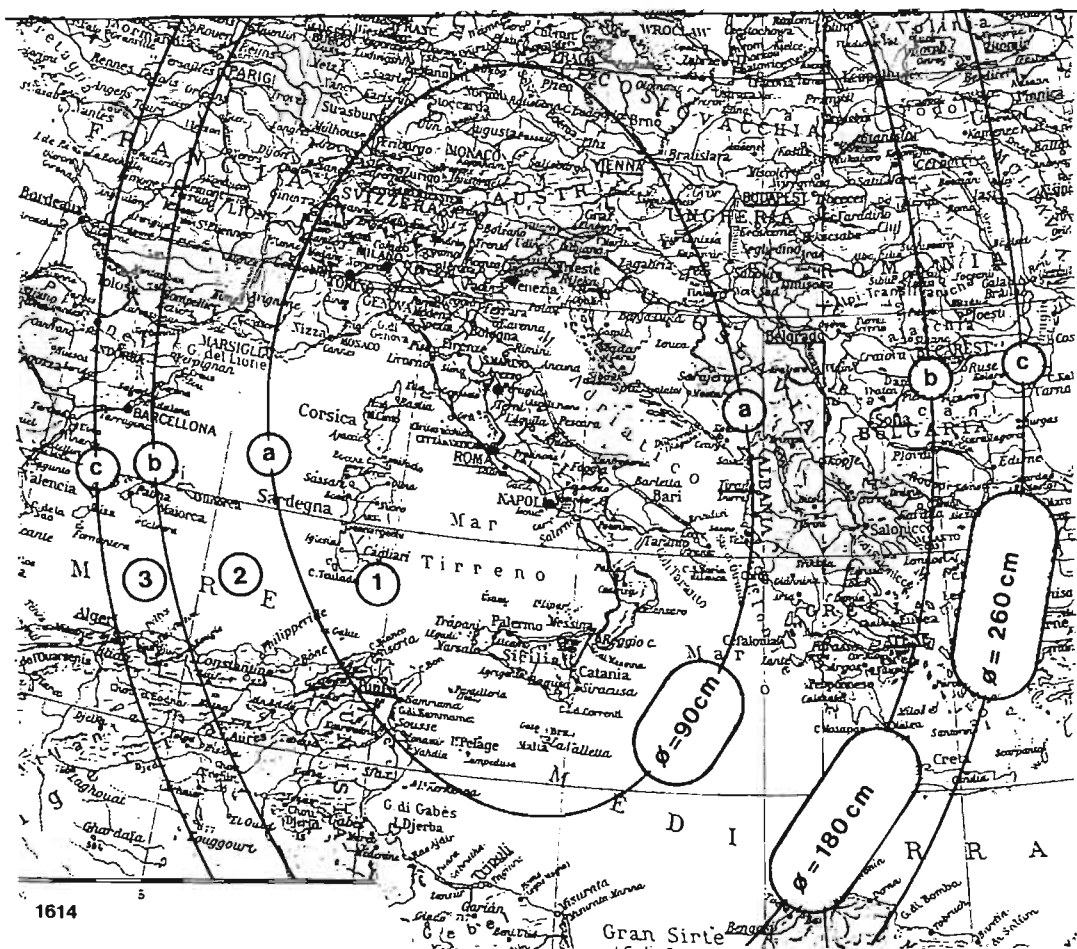



Fig. 7 — Nella figura sono indicati i punti riceventi e sono individuate tre zone: 1, 2 e 3, delimitate da tre curve: a, b e c, sulle quali sono indicati i diametri delle antenne riceventi necessari, all'interno delle zone, per ottenere un rapporto C/N di 19 dB (in 27 MHz) per il 99% del tempo nel mese peggiore.

la stazione fissa di Roma (bibl. 6). L'uso dell'Olympus era inoltre vantaggioso per vari motivi:

— la completa disponibilità del canale 24, normalmente utilizzato per le trasmissioni sperimentali di RAI-SAT;
— la grande area di copertura consentita dall'elevata potenza irradiata (Eirp = 63 dBW sull'asse dell'antenna trasmittente);
— la disponibilità della stazione fissa di feeder-link, presso il Centro di produzione RAI di Roma e di una stazione trasportabile in costruzione presso la Selenia Spazio.

La flessibilità operativa dei codec Telettra ha consentito di operare con due catene di produzione HDTV separate: una secondo il formato di scansione europeo a 1250 linee/50 Hz gestita da EU-95 con l'appoggio diretto della RAI ed installata presso lo stadio Olimpico di Roma. I segnali di banda base video ed audio (un canale stereo ed un canale con effetti sourround) forniti dai mezzi di ripresa venivano codificati sotto forma numerica ed inviati tramite collegamento in fibra, su due flussi a 34,368 Mbit/s, al Centro di produzione RAI per la trasmissione verso l'Olympus a 70 Mbit/s in QPSK sul canale 24. Gli stessi segnali di banda base venivano anche inviati ad un codificatore HD-MAC installato da EU-95 presso lo stadio Olimpico. Il segnale HD-MAC veniva quindi inviato su collegamento in fibra ottica al Centro di produzione RAI per essere trasmesso con modulazione di frequenza sul canale 20 dell'Olympus (il canale a copertura europea normalmente utilizzato dalla BBC) verso alcuni punti di ricezione dislocati in Europa. Questa operazione era gestita diretamente da EU-95. La stazione trasmittente fissa della RAI, a Roma, trasmetteva quindi contemporaneamente in diretta via Olympus le cinque partite giocate allo stadio Olimpico in HDTV numerica a 70 Mbit/s sul canale 24 ed in HD-MAC sul canale 20.

La seconda catena di produzione operava nel formato di scansione a 1125 linee/60 Hz con un automezzo di ripresa dell'NHK direttamente interconnesso alla stazione trasmittente trasportabile del *Centro Ricerche* RAI sulla quale erano installati il codec HDTV ed il modem a 70 Mbit/s QPSK. L'agilità operativa di questa seconda catena di produzione consentiva alla RAI di riprendere in diretta 10 partite giocate negli stati di Torino, Milano, Firenze e Napoli.

Otto punti riceventi, che alimentavano le sale di visione HDTV con proiezione su grande schermo, venivano installati dal *Centro Ricerche* RAI a Torino (2), Milano, Venezia, Perugia, Roma (2) e Napoli. La configurazione della rete di trasmissione e distribuzione del segnale via Olympus è descritta in dettaglio in bibliografia 7.

La figura 7 mostra l'area di copertura dell'Olympus sul canale 24. Sono indicate le posizioni delle installazioni riceventi realizzate dal *Centro Ricerche* in Italia e l'installazione realizzata dalla Retevision a Barcellona. Qui il segnale ricevuto dal satellite veniva inviato a Madrid, su due flussi a 34 Mbit/s, tramite un collegamento in fibra ottica di circa 620 Km. A Barcellona ed a Madrid erano allestite due sale visione con proiezione su grande schermo.

È indicato sulle varie curve di figura 7 il diametro dell'antenna ricevente necessario per ottenere per il 99% del mese peggiore un rapporto C/N (in 27 MHz) di almeno 19 dB, assumendo una figura di rumore del ricevitore di 2 dB. Il valore di 19 dB del rapporto C/N corrisponde al *minimo* richiesto per il corretto funzionamento del sistema (vedi par. 3.3), ossia con immagini HDTV non degradate da errori di trasmissione (BER $< 10^{-6}$ sul canale). Per garantire tale valore di C/N nei paesi situati sulla curva a − 3 dB di figura 7 si richiedono antenne da 90 cm mentre a Barcellona occorre una antenna di almeno 2 m.

Data l'importanza della sperimentazione, in cui veniva coinvolto un vasto pubblico, si decideva di aumentare sensibilmente il diametro delle antenne riceventi onde garantire adeguati margini di ricezione anche in condizioni di propagazione molto sfavorevoli (ad es. in presenza di pioggia sia sulla tratta in salita a 18 GHz che su quella in discesa a 12 GHz). Nei punti riceventi in Italia si impiegavano antenne da 1,8 m mentre a Barcellona veniva installata una antenna da 2,8 m.

Per quanto riguarda le prestazioni dell'intero collegamento numerico che, oltre all'impiego del satellite Olympus, includeva tratte su fibra ottica si sono ottenuti i seguenti risultati:

— i valori del rapporto C/N misurati a cielo chiaro nelle varie località sul territorio nazionale risultavano compresi tra 29 dB al nord (Torino e Milano) e 32 dB a Roma. Questi valori sono risultati in buon accordo con le stime ottenute dai bilanci di collegamento;
— gli elevati margini di ricezione del segnale (10 dB al nord e 13 dB a Roma) hanno consentito di operare con una disponibilità del servizio superiore al 99,9% durante l'intero periodo delle dimostrazioni, per un totale di circa 50 ore di trasmissione;
— il segnale HDTV è stato ricevuto con successo a Torino, a scopi sperimentali, anche con un'antenna di soli 70 cm, con un margine di C/N di circa 3 dB a cielo chiaro;
— i sistemi riceventi appositamente sviluppati dal Centro Ricerche si sono dimostrati affidabili e perfettamente adeguati alla ricezione del segnale numerico;
— la stazione trasmittente installata presso il Centro di produzione RAI di Roma ha operato con stabilità ed affidabilità a lungo termine senza richiedere particolari interventi di allineamento e controllo; qualche problema, peraltro sempre superato dal personale addetto, si è avuto con la stazione trasmittente trasportabile che si è spesso trovata ad operare in difficili condizioni ambientali. Si deve rilevare però che tale stazione è entrata praticamente in servizio al momento stesso della consegna da parte della Selenia Spazio, senza la possibilità di completare le operazioni di allineamento e collaudo.
— i collegamenti in fibra ottica si sono dimostrati totalmente «trasparenti» al trasporto del segnale numerico;

È importante osservare che le prestazioni dell'intero sistema di trasmissione a 70 Mbit/s in QPSK possono essere ulteriormente migliorate a breve termine operando sia sul modem che sul codec HDTV. Sul modem è possibile infatti impiegare uno scrambler-descrambler di tipo «sincronizzato» sulla trama in sostituzione a quello di tipo «autosincronizzante» disponibile ad Italia '90. Ciò consentirebbe di operare con un tasso di errore sul canale di 10^{-5}, invece di 10^{-6}. Un guadagno di circa 1,5 dB sul C/N sarà possibile con la seconda generazione di codec HDTV che disporranno di un codice correttore di errore di tipo RS(255,239), sensibilmente superiore all'attuale codice BCH(255,239). Con questi possibili miglioramenti sul modem e sul codec il sistema potrà operare via Olympus con un rapporto C/N minimo di circa 16 dB contro i 19 dB di Italia '90. È importante osservare inoltre che l'impiego di tecniche di «compensazione del movimento» nei codec della seconda generazione consentirà di migliorare ulteriormente la qualità delle immagini a parità di bit-rate (70 Mbit/s), oppure di ridurre ulteriormente il bit-rate (presumibilmente verso i 50 ÷ 60 Mbit/s) mantenendo la stessa qualità dimostrata ad Italia '90.

In un'ottica a più lungo termine sarà possibile disporre di tecniche di modulazione e codifica di canale più sofisticate basate sulla decodifica di Viterbi, in grado di migliorare sensibilmente le prestazioni dell'intero collegamento. A titolo di esempio la modulazione Trellis-coded 8-PSK con rate 5/6 (bibl. 8) consentirà di eliminare le distorsioni lineari introdotte dal filtro IMUX dell'Olympus e ridurre le interferenze sui canali adiacenti (grazie ad una occupazione spettrale ridotta del 20% rispetto al QPSK), oltre a consentire un certo guadagno di codifica (1 ÷ 2 dB). La stessa modulazione con rate 2/3, o la modulazione QPSK associata a codifica convoluzionale con rate 3/4 (bibl. 9), entrambe concatenate ad un codice di Reed-Solomon (255,239) associato al codec HDTV, consentirebbero di operare anche su Eutelsat I con antenne riceventi di diametro contenuto. I valori del rapporto C/N in 27 MHz richiesti da questi sistemi, includendo 2 dB di margine di implementazione, sono di circa 13 dB (per il Trellis coded 8-PSK rate 2/3) e 11,5 dB (per il QPSK con convoluzionale 3/4), contro i 16 ÷ 17 dB richiesti con la semplice modulazione QPSK ed il codice BCH(255,239).

5. Conclusioni

Gli esperimenti effettuati dalla RAI nell'occasione della Coppa del Mondo di calcio (Italia '90) hanno dimostrato, in anteprima mondiale, la fattibilità tecnica ed operativa di un sistema di trasmissione numerica a 70 Mbit/s per il trasporto punto-multipunto di segnali HDTV di alta qualità tramite una articolata rete di distribuzione includente il satellite Olympus e collegamenti numerici in fibra ottica, anche su lunga distanza.

Le principali conclusioni che si traggono dalla sperimentazione si possono così sintetizzare:

— la qualità delle immagini ricevute da satellite, visualizzate su monitori HDTV di tipo professionale, è risultata potenzialmente uguale a quella disponibile alla sorgente. Il sistema di co-decodifica a 70 Mbit/s sviluppato nell'ambito del progetto europeo EU-256 si è dimostrato quindi «trasparente» per la distribuzione di segnali HDTV di elevata qualità;
— le elevate prestazioni dell'intera catena di trasmissio-

ne numerica, in termini di immunità agli errori di trasmissione con elevati margini di corretta ricezione anche in cattive condizioni di propagazione, hanno confermato i vantaggi della soluzione numerica nelle applicazioni punto-multipunto. A questo si aggiunga la possibilità dei codec numerici di operare in un contesto di produzione HDTV misto, a 50 Hz ed a 60 Hz. I risultati conseguiti ad Italia '90 consentiranno alla RAI di contribuire alla futura attività del Project Group 04 di EU-95 che prevede lo sviluppo di sistemi numerici avanzati per il trasporto punto-punto via satellite di segnali HDTV con qualità contributo. Sarà inoltre possibile contribuire agli studi dell'UER e del CCIR sui sistemi di HDTV numerici a «larga banda» per diffusione diretta da satellite in vista della WARC '92, nonché all'attività del CNR nel quadro del Piano Finalizzato delle Telecomunicazioni.

(3930)

RINGRAZIAMENTI

Gli Autori desiderano ringraziare l'Ing. G. P. Pacini e l'Ing. G. Moro per la collaborazione nella valutazione dei link-budget e nel dimensionamento delle stazioni di terra per Olympus ed Eutelsat I.

BIBLIOGRAFIA

1. - M. Cominetti, A. Morello: *Trasmissione da satellite di segnali televisivi numerici: prestazioni e prospettive*, 35° Congresso per L'Elettronica, Roma 1988.
2. - M. Cominetti, A. Morello, M. Visintin: *Digital transmission of television signals by satellite*, ITU COM '89, Geneva, October 1989.
3. - EBU: *Specification of the Systems of the MAC/packet family*, Doc. Tech. 3258, 2ª Edizione, EBU Bruxelles, Luglio 1990.
4. - G. P. Pacini: *Ipotesi di trasmissione HDTV a 70 Mbit/s tramite satellite EUTELSAT dagli stadi. Link-budget*, «RAI-Centro Ricerche», Relazione Tecnica n. 88/13/I.
5. - G. P. Pacini: *Stazione mobile per trasmissione a Olympus. Pacco 18-12 GHz*, «RAI-Centro Ricerche», Relazione Tecnica n. 88/14/I.
6. - G. Garazzino, A. Morello, B. Sacco: *Prove di trasmissione di segnali QPSK e 70 Mbit/s via Olympus dalla stazione del CPTV RAI di Roma*, «RAI-Centro Ricerche», Relazione Tecnica n. 90/01/I.
7. - M. Ardito, G. F. Barbieri, M. Cominetti: *ITALIA '90: Prima mondiale di collegamento HDTV numerico via satellite*, «Elettronica e Telecomunicazioni» in questo numero.
8. - G. Montorsi, A. Morello: *Performance of trellis coded 8-PSK with rate 2/3 on satellite channels*, «RAI-Centro Ricerche», Relazione Tecnica no. 90/2/E.
9. - M. Visintin: *Performance of QPSK with rate 1/2 and 3/4 convolutional codes on satellite channels*, «RAI-Centro Ricerche», Relazione Tecnica no. 90/1/E.

ITALIA '90: CODIFICA DEL SEGNALE TELEVISIVO NUMERICO

M. BARBERO, S. CUCCHI, R. DEL PERO, G. DIMINO,
M. OCCHIENA, M. MURATORI, M. STROPPIANA*

SOMMARIO — Il co-decodificatore utilizzato nel corso dell'esperimento di trasmissione punto-multipunto via satellite di segnali HDTV in occasione dei campionati mondiali di calcio Italia '90 è stato sviluppato nell'ambito del progetto europeo Eureka EU 256. Su «Elettronica e Telecomunicazioni» sono già comparsi numerosi articoli relativi alle attività di ricerca volte all'ottimizzazione di tale sistema di riduzione della ridondanza, sistema basato sull'uso della Trasformata Coseno Discreta (DCT). Il presente articolo è corredato di un'ampia bibliografia e riassume brevemente le tappe fondamentali di tali studi e dell'attività di normalizzazione internazionale per quanto riguarda i sistemi di compressione del segnale TV e HDTV. Descrive inoltre la struttura del codec HDTV impiegato durante Italia '90 e fornisce indicazioni sulle attività di ricerca e di sviluppo previste per i prossimi mesi.

SUMMARY — ***Italia '90: Digital TV signal coding*** *- The co-decoder used in the experiments of point-to-multipoint satellite transmission of HDTV signals, on the occasion of the FIFA WorldCup Italia '90, has been developed in the Framework of the European project Eureka EU 256. Various articles about the research activities to optimise this bit-rate reduction system, based on the Discrete Cosine Transform (DCT), have already been issued on «Elettronica e Telecomunicazioni». This article is provided with an extended list of references and briefly summarises the main steps of such studies and the international activities to standardise the compression system to be applied to TV and HDTV signals. Morevore it describes the actual structure of the HDTV codec used for Italia '90 and provides some information on the research and development activities foreseen for the next few months.*

1. Premessa

Un elemento fondamentale per la riuscita dell'esperimento di collegamento punto-multipunto realizzato nel corso di Italia '90 è stato ovviamente il co-decodificatore. La sua funzione è quella di ridurre la ridondanza presente nel segnale HDTV al fine di consentirne la trasmissione utilizzando un canale di capacità limitata, quale quello disponibile tramite il satellite Olympus.

Sul sistema di riduzione della ridondanza sviluppato nell'ambito del progetto europeo Eureka EU 256[1] è già comparsa una serie di articoli su questa rivista.

Per tale ragione in qualità di autori degli articoli già pubblicati o di prossima pubblicazione ci limitiamo, in occasione di questo numero speciale di Elettronica e Telecomunicazioni, a riassumere brevemente le caratteristiche principali del sistema EU 256 e a fornire alcune indicazioni sugli ulteriori sviluppi previsti per i prossimi mesi.

(*) Ing. Marzio Barbero, ing. Roberto Del Pero, ing. Giorgio Dimino, p.i. Massimo Occhiena, ing. Mario Muratori, dott. Mario Stroppiana del Centro Ricerche RAI - Torino e ing. Silvio Cucchi della Telettra S.p.A. - Vimercate (MI).
Dattiloscritto pervenuto alla Redazione il 29 ottobre 1990.

[1] EU 256 (Bit-Rate Reduction System for HDTV Digital Transmission) è il progetto europeo Eureka tra la RAI e la Telettra S.p.A. per l'Italia e la Retevision, la Telettra Espana S.A. e Universidad Politecnica de Madrid per la Spagna.

2. Alcuni cenni storici

La presentazione dell'attività di normalizzazione a livello internazionale e della ricerca volta a determinare ed ottimizzare la struttura degli algoritmi di codifica, la descrizione del sistema di riduzione della ridondanza e la divulgazione dei risultati via via ottenuti sono state oggetto di numerosi articoli e contributi a convegni (bibl. 1, 2, e «Elettronica e Telecommunicazioni», n. 1, 1989 e n. 1, 1990).

Il sistema di riduzione del flusso di informazione binaria (BRR, Bit-Rate Reduction) studiato nell'ambito di EU 256 è basato sull'uso della Trasformata Coseno Discreta (DCT, Discrete Cosine Transform) che consente di sostituire agli elementi di immagine (pel) i coefficienti DCT che presentano una minore mutua correlazione. Un'analisi dei metodi di riduzione della ridondanza e la formulazione matematica della DCT sono riportati in precedenti articoli. La DCT ha assunto un ruolo fondamentale in tutti i sistemi di BRR e chi è interessato ad una trattazione ampia e aggiornata dell'argomento può fare riferimento ad un libro di recentissima pubblicazione (bibl. 3).

La figura 1, precedentemente pubblicata, presenta una descrizione schematica del sistema di codifica ibrido utilizzato, in grado di sfruttare sia la ridondanza temporale, mediante codifica predittiva, sia quella spaziale, grazie alla trasformata DCT.

Per ridurre la ridondanza statistica associata ai coefficienti DCT relativi alle immagini video (bibl. 4) si fa uso dei codici a lunghezza variabile (VLC, Variable Lenght Code); nei succitati numeri di «Elettronica e Telecomu-

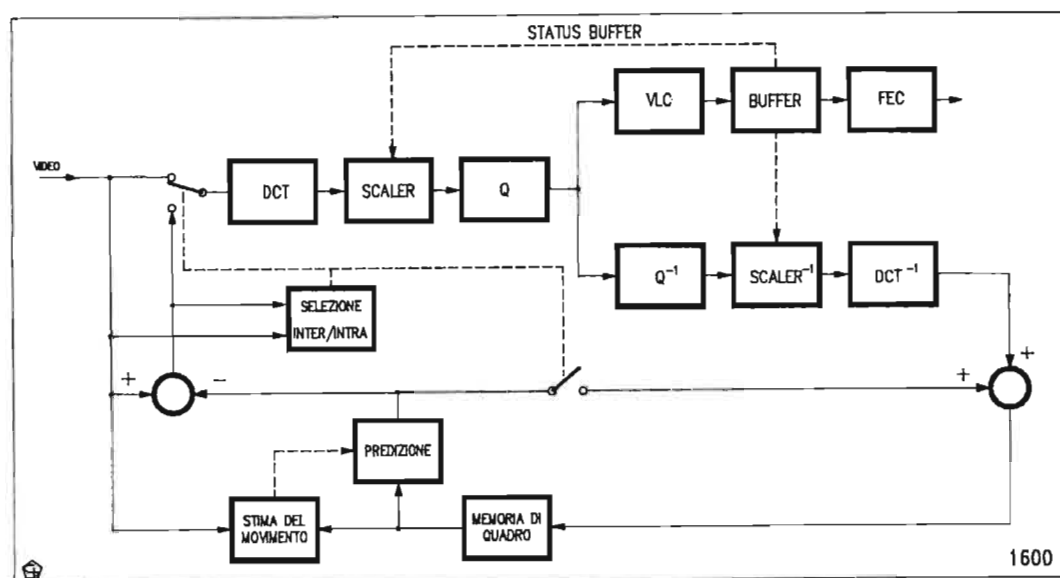



Fig. 1 — Schema a blocchi di un codificatore basato sull'uso della Trasformata Coseno Discreta ibrida. I campioni in ingresso, organizzati in gruppi di 8 · 8, vengono trasformati (DCT), moltiplicati per un fattore di scalamento (SCALER) in base al riempimento del buffer, quantizzati (Q), codificati con parole a lunghezza variabile (VLC) e memorizzati nel BUFFER. Ad essi viene successivamente aggiunta la ridondanza necessaria per la protezione dagli errori introdotti dal canale (FEC). I dati di ingresso al circuito che calcola la DCT possono essere campioni video (modo intra-field) oppure differenze fra il valore di ciascun campione e un valore di predizione ottenuto a partire dai campioni appartenenti al semiquadro precedente (modo inter-field) o da quelli appartenenti al semiquadro ancora prima (modo inter-frame). In quest'ultimo caso i valori di predizione possono essere ottenuti applicando tecniche di stima e compensazione del movimento. I dati di predizione devono essere uguali, a meno di differenze dovute ad errori di trasmissione, a quelli disponibili dal lato di decodifica; per tale ragione i campioni di riferimento memorizzati nella memoria di quadro sono ottenuti mediante le operazioni inverse di quantizzazione (Q^{-1}), scalamento ($SCALER^{-1}$) e trasformata (DCT^{-1}) a partire dai dati in trasmissione.

nicazioni» si descrivono i diversi VLC proposti in sede internazionale e si analizza in particolare il B-code, cioè il VLC utilizzato nel codec EU 256.

La struttura di trama del segnale video codificato, insieme alla scelta del codice VLC, ha una parte rilevante nelle prestazioni del sistema in presenza di errori introdotti dal canale (bibl. 5).

La scelta di un'organizzazione a pacchetti dei dati video è stata inoltre operata al fine di semplificare la realizzazione del codec con le tecnologie attualmente disponibili e consentire l'uso di un'architettura modulare per il codec HDTV (bibl. 6).

Il sistema sviluppato in EU 256 è in grado di operare su segnali video di diverso formato e di adattare il flusso di dati generato alle capacità del canale disponibile.

Una versione del codec è utilizzata per la codifica dei segnali video a componenti e a definizione convenzionali, quelli cioè conformi alla Raccomandazione CCIR 601 e normalmente indicati con il termine «segnali 4:2:2». I parametri di tale sistema di codifica sono stati oggetto di discussione nel gruppo di lavoro interinale IWP CMTT/2, a cui hanno partecipato attivamente alcuni dei ricercatori coinvolti nel progetto EU 256, in rappresentanza di Italia e Spagna. Recentemente è stata emessa una nuova Raccomandazione, la 723, che specifica i principali parametri di codifica per i segnali televisivi a 525 e 625 righe. I risultati ottenuti nel corso del lavoro di ottimizzazione dell'algoritmo e la dimostrazione della loro realizzabilità pratica hanno fatto sì che il metodo di BRR specificato nella Raccomandazione sia sostanzialmente in accordo con le scelte operate per il codec EU 256.

La raccomandazione 723 attualmente non specifica il VLC, la struttura di trama video e i metodi di adattamento alla rete, cioè ai diversi protocolli di trasmissione. Tali elementi sono ancora in discussione: è probabile che prossimamente venga prodotto uno standard europeo da parte dell'ETSI (European Telecommunications Standards Institute) per la trasmissione di segnali 4:2:2 per applicazioni ad uso contributo a 34 Mbit/s. Tale norma sarà basata sui parametri indicati nella 723, ma completa anche per quanto riguarda gli elementi in essa ancora mancanti. L'UER (Union Europeenne de Radiodiffusion) si è impegnata ad utilizzare tale norma, appena disponibile, per la rete eurovisione. Se ciò avverrà, è probabile che anche la 723 venga completata sulla base della scelta operata in ambito europeo e che si pervenga quindi ad un sistema unico mondiale per la trasmissione a 34 e 45 Mbit/s del segnale 4:2:2.

3. La situazione attuale

I codec utilizzati nel corso delle sperimentazioni di Italia '90 sono basati sulla struttura descritta nelle sue linee essenziali in bibliografia 6. Allo scopo di riassumere brevemente le caratteristiche del codificatore HDTV, si riporta in figura 2 lo schema a blocchi relativo alla sua architettura, mentre in figura 3 è rappresentato uno degli apparati di codifica utilizzato nel corso di Italia '90.

La struttura modulare del codificatore e, in modo del tutto duale, del decodificatore consente di dividere il flusso binario corrispondente ad un segnale HDTV in quattro flussi, ciascuno corrispondente ad un segmento verticale dell'immagine da elaborare.

Si consideri, ad esempio, il segnale corrispondente al

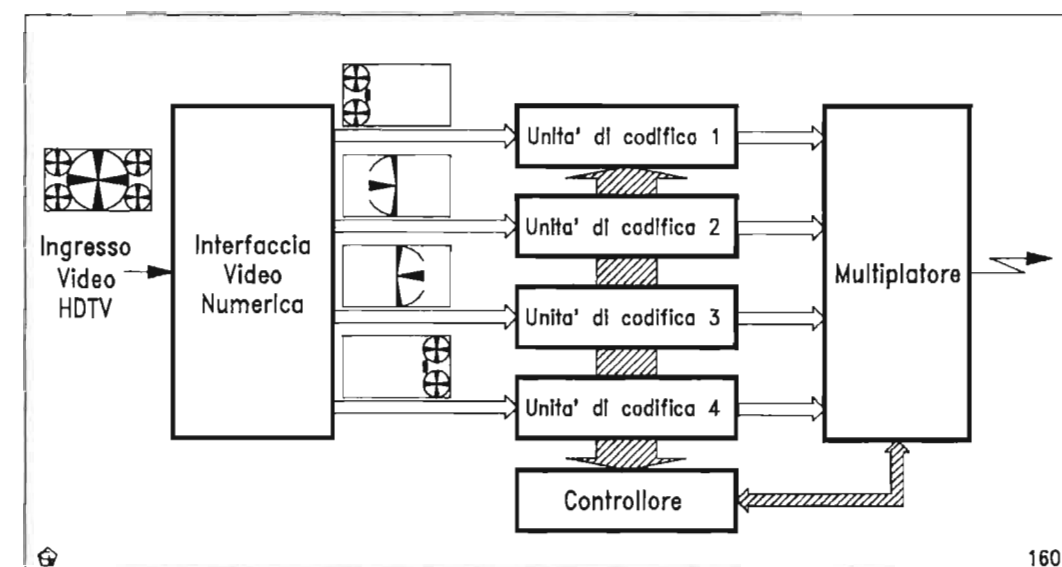



Fig. 2 — Il codificatore HDTV utilizzato nel corso delle trasmissioni Italia '90 è composto da una interfaccia d'ingresso che suddivide i campioni video attivi in quattro flussi. Ciascun flusso corrisponde ad uno dei quattro segmenti verticali in cui è suddivisa l'immagine HDTV. I dati risultanti sono memorizzati in un buffer e da qui prelevati, sotto forma di pacchetti, per essere multiplati e trasmessi. Il Controllore di buffer sovraintende alla organizzazione dei pacchetti, al loro prelievo ed alla determinazione del fattore di trasmissione in base all'occupazione dei quattro buffer.

formato HDTV europeo di tipo interlacciato (1250 righe per quadro e 25 quadri al secondo): se esso è campionato con una frequenza di campionamento pari a 54 MHz vengono generati 1440 campioni di luminanza e 720 campioni per ciascuna delle due componenti di crominanza in corrispondenza della porzione attiva di ogni riga di immagine.

Grazie alla interfaccia di ingresso del codificatore si creano quattro flussi pari a 720 campioni (di cui 360 di luminanza) per ciascuna delle 1152 righe attive costituenti i 25 quadri al secondo; ciascun flusso è dunque pari a 165,888 Mbit/s, essendo ciascun campione codificato con una parola di 8 bit. Questo flusso è esattamente quello corrispondente ad un segnale 4:2:2.

Il codificatore HDTV è quindi costituito da quattro unità di codifica identiche, e ciascuna di esse ha le capacità di elaborazione sufficienti per operare su un segnale 4:2:2. Questa struttura parallela ha consentito di utilizzare, anche nel caso del segnale HDTV, la tecnologia oggigiorno disponibile, con un alto livello di integrazione e operante ad un clock non superiore a 30 MHz. La struttura modulare permette di realizzare i complessi algoritmi richiesti per ridurre la quantità di dati da trasmettere di circa un fattore dieci: infatti in base ai valori precedentemente indicati il flusso binario in ingresso al codificatore è circa 660 Mbit/s, mentre la velocità di trasmissione sul canale via satellite è di circa 70 Mbit/s, comprensivi di audio e ridondanza per protezione dagli errori di canale (54 Mbit/s per il video).

Il codec così realizzato è in grado di operare con segnali HDTV conformi sia al formato europeo precedentemente citato, sia a quello proposto in Giappone e USA, cioè 1125 righe per quadro e 30 quadri al secondo. Nel corso della sperimentazione Italia '90 sono stati trasmessi e presentati al pubblico segnali prodotti secondo entrambi i formati. Il codec è inoltre in grado di operare con diverse velocità di trasmissione: nel caso specifico si è utilizzata una velocità pari a circa 70 Mbit/s in quanto questo valore costituisce il compromesso ottimale tra qualità del segnale decodificato e banda disponibile sul canale del satellite Olympus.

4. Prospettive per l'immediato futuro

Si è detto che l'attuale codec è in grado di elaborare segnali HDTV campionati a 54 MHz, con una definizione corrispondente a 1440 campioni di luminanza per la parte attiva della riga video. Tale precisione è largamente sufficiente se si considera la banda dei segnali attualmente forniti dalle telecamere HDTV e la definizione apprezzabile con i monitori e proiettori a grande schermo oggigiorno disponibili. Tuttavia i formati attualmente proposti per gli studi HDTV prevedono 1920 pel: per consentire la trasmissione del segnlae HDTV con qualità prossima a quella di studio e sufficiente per alcune operazioni di postproduzione, fra cui il «colour matte» o «intarsio», è in corso di realizzazione una nuova versione del codec in grado di elaborare la quantità di dati corrispondente anche agli ulteriori 960 campioni (480 di luminanza e 240 per ognuna delle crominanze).

Nel corso delle trasmissioni la qualità del segnale decodificato è risultata ottima, non distinguibile da quella del segnale all'uscita delle telecamere. Poiché nel caso di riprese sportive si fa ampio uso di carrellate o «panning», la stessa qualità è in genere ottenibile a velocità di trasmissione inferiori, in alcuni casi anche del 30%; questo ulteriore risparmio è ottenibile applicando tecniche di valutazione del movimento dal lato codificatore e di compensazione del movimento in co-decodifica. Tali tecniche permettono di ottenere una migliore predizione temporale e di conseguenza un maggior sfruttamento della ridondanza del segnale video. La trasmissione può quindi avvenire a pari qualità con velocità di segnalazione inferiore, oppure una migliore qualità è ottenibile a parità di velocità di trasmissione, garantendo così un margine nel caso di immagini particolarmente critiche e per quando, in futuro, saranno disponibili telecamere e dispositivi di visualizzazione capaci di una maggiore definizione.

Durante le trasmissioni di Italia '90 non sono stati riscontrati problemi dovuti agli errori introdotti del canale. Si è quindi dimostrano che il sistema di protezione utilizzato, basato sul codice per la correzione degli errori Bose-Chaudhuri-Hocquenghem BCH (255,239) è molto

Fig. 3 — Uno dei codificatori HDTV utilizzati per Italia '90. L'unità di conversione analogico/numerica, realizzata presso il Centro Ricerche RAI, fornisce il segnale numerico mediante un'interfaccia parallela su 16 bit più il clock al codificatore realizzato dalla Telettra. Il codificatore è racchiuso in un sottotelaio da 19" di larghezza e 6 unità di altezza. Il consumo è pari a circa 200 W. Le schede componenti il codificatore sono di 230 per 280 mm. Il flusso di dati in ingresso è suddiviso da una scheda di interfaccia nei quattro flussi corrispondenti ai segmenti verticali in cui è suddivisa l'immagine. Ciascun flusso è elaborato da due schede: la prima calcola i valori di predizione, sceglie il modo di codifica e calcola i coefficienti DCT; la seconda scheda codifica i coefficienti con parole VLC e le memorizza in un buffer di 4 Mbit. La scheda del controllore del buffer gestisce l'insieme dei quattro buffer appartenenti alle unità di codifica. Un'altra scheda provvede ad aggiungere la ridondanza per il codice per la protezione dagli errori di canale e a multiplare i dati provenienti dalle quattro unità di codifica video e da quella per la codifica dei segnali audio e dati ausiliari.

efficace. Ciononostante sarà presto disponibile, in alternativa al BCH, anche il codice Reed-Solomon RS (255,239), che offre prestazioni migliori in presenza di sequenze di errori (errori a burst). Tale codice è quello previsto dalla Raccomandazione 723.

Tutti questi miglioramenti, estensione a 1920 pel, compensazione del movimento e codice Reed Solomon, saranno introdotti nelle nuove versioni del codec sviluppate nella prima metà del 1991.

La valutazione delle prestazioni del sistema nel caso di immagini particolarmente critiche o in presenza di errori introdotti dal canale sono state oggetto di prove soggettive basate su simulazioni effettuate usando sequenze 4:2:2 (bibl. 7). I risultati di tali simulazioni sono state sostanzialmente confermati dalle prove effettuate utilizzando il codec reale, sia nella versione atta ad elaborare i segnali 4:2:2, sia quelli HDTV. Ulteriori prove soggettive sono già in programma, per completare la valutazione del sistema attuale e per consentire lo studio di ulteriori miglioramenti ed estensioni.

Le attività di ricerca e di ottimizzazione relative alle tecniche di riduzione della ridondanza del segnale video e di adattamento delle stesse alle varie applicazioni, ad esempio alla trasmissione a velocità di segnalazione costante oppure variabile (bibl. 8) ed alla registrazione, non accennano a diminuire, come testimonia la costituzione di diversi gruppi di normalizzazione e l'avvio di nuovi progetti di ricerca.

BIBLIOGRAFIA

1. - Barbero M., Del Pero R., Muratori M., Stroppiana M.: *Bit-Rate Reduction Techniques based on DCT for HDTV Transmission.* SUPERCOMM ICC '90, Atlanta USA, Aprile 1990.
2. - Ardito M., Barbero M.: *Point-to-Multipoint Transmission of TV and HDTV Signals.* ITU/CyBC Seminar on New Technologies in Sound and Television Broadcasting, Nicosia Cipro, Ottobre 1990.
3. - Rao K. R., Yip P.: *Discrete Cosine Transform: Algorithms, Advantages, Applications.*, Academic Press Inc., 1990
4. - Bellora R., Dimino G., Muratori M.: *Hybrid DCT: comparison of the statistics of DCT coefficients and processing modes with and without motion compensation*, in «Signal Processing of HDTV, 2», Elsevier Science Publishers (Proc. of the 3rd Int. Workshop on HDTV, Torino I, Agosto 1989)
5. - Del Pero R., Giromini P., Morello A., Barbero M.: *Criteria for the protection of the video information in a codec based on DCT*, in «Signal Processing of HDTV, 2» Elsevier Science Publishers (Proc. of the 3rd Int. Workshop on HDTV, Torino I, Agosto 1989.
6. - Barbero M., Cucchi S., Hernando Bailon J. L.: *A Flexible Architecture for a HDTV Codec based on DCT*, in «Signal Processing of HDTV, 2», Elsevier Science Publishers (Proc. of the 3rd Int. Workshop on HDTV, Torino I, Agosto 1989.
7. - Ardito M., Barbero M., Ibañez D.: *Performance of Codecs for Bit-Rate Reduction applied on Conventional TV and HDTV Signals*, IBC '90, Brighton UK, Settembre 1990.
8. - Barbero M., Del Pero R., Ravera S., Rossato L.: *The use of bitrate reduction techniques for the transmission of video signals*, DSP90 - 2nd Int. Workshop on Digital Signal Processing Techniques Applied to Space Communications, Torino I, Settembre 1990.

ITALIA '90: STAZIONI TRASMITTENTI DI SEGNALI HDTV NUMERICI VIA SATELLITE OLYMPUS

F. BONACOSSA, G. MORO, B. SACCO, D. TABONE*

SOMMARIO — Per trasmettere in HDTV numerica le partite della recente Coppa del Mondo di Calcio, la RAI ha impiegato due stazioni trasmittenti verso il satellite Olympus. Per le partite di Roma e per le repliche si è adattata alla trasmissione numerica la stazione fissa di Roma RAI CPTV, normalmente impiegata come stazione di salita di RAI-SAT. Per le partite giocate negli altri stadi la RAI ha impiegato una stazione trasportabile espressamente progettata per segnali numerici. In questo articolo si illustrano le caratteristiche tecniche e la funzionalità delle due stazioni.

SUMMARY — ***ITALIA '90: Up-link earth stations for digital HDTV signals via Olympus satellite*** *- As regards the digital HDTV transmission of the matches played at the FIFA World Cup 1990 in Italy, the RAI used two up-link earth stations to the Olympus satellite. The fixed up-link earth station of the RAI Production Centre in Rome, generally used as the feeder-link of RAI-SAT, was adapted to transmit the matches played in Rome and the repeats. As for the matches played in the other stadiums the RAI used a transportable earth station designed for digital signals on purpose. This paper illustrates the technical characteristics and the operational capability of the two stations.*

1. Introduzione

In altro articolo, su questo stesso numero della rivista, si descrive l'organizzazione generale dell'esperimento di HDTV digitale condotto dalla RAI durante la recente Coppa del Mondo di Calcio, Italia '90.

L'obiettivo era di mostrare in alcuni punti di visione, predisposti in Italia a cura della RAI, la qualità delle immagini delle partite riprese in alta definizione e trasmesse via satellite con codifica e modulazione digitale.

Le sedici partite oggetto dell'esperimento in alta definizione numerica sono state trasmesse via satellite Olympus: con la stazione trasmittente fissa di Roma, presso il Centro di produzione TV della RAI, sono state trasmesse le partite giocate allo stadio Olimpico di Roma, mentre quelle giocate negli stadi di Torino, Milano, Firenze, Napoli sono state trasmesse mediante una stazione trasportabile costruita appositamente dalla Selenia Spazio su specifiche fornite dal *Centro Ricerche* RAI (vedi bibl. 1).

Altri articoli illustrano come le partite di Roma siano state riprese secondo lo standard di produzione europeo (1250/50/2:1) con telecamere sviluppate nell'ambito del progetto Eureka Eu-95, mentre le altre partite sono state oggetto di una coproduzione RAI-NHK con riprese secondo lo standard giapponese (1125/60/2:1) con l'impiego di mezzi itineranti NHK affiancati alla stazione mobile RAI (Fig. 1).

In questo articolo si esaminano le caratteristiche delle due stazioni impiegate durante l'esperimento.

2. Uso delle stazioni trasmittenti trasportabili

I vantaggi importanti che le comunicazioni via satellite offrono ai radio-diffusori sono noti da tempo.

In tema di riprese esterne l'uso del satellite consente di «esercire» qualunque località del territorio nazionale pur in presenza di difficoltà legate alla montuosità del posto o, come nelle città, alla vicinanza di edifici di ostacolo al collegamento.

Una stazione trasportabile in grado di trasmettere al satellite permette di inviare i segnali del programma ver-

Fig. 1 — La stazione trasportabile, costruita dalla Selenia Spazio, in postazione presso lo Stadio Olimpico di Roma.

* P.i. Fulvio Bonacossa, ing. Giovanni Moro, ing. Bruno Sacco, p.i. Dario Tabone del Centro Ricerche RAI - Torino.
Dattiloscritto pervenuto alla redazione il 30 ottobre 1990.

so il centro di Controllo, o, come nel caso di Italia '90, direttamente verso i punti visione quando si tratti di esperimento punto-multipunto.

3. Il segmento spaziale

È stato usato il satellite Olympus e non il già da tempo usato ECS, perché calcoli preliminari e poi la sperimentazione notturna con il canale RAI di ECS, fatta dalla stazione del Fucino, con la fattiva collaborazione di Telespazio (vedi bibl. 2) cui va il nostro ringraziamento doveroso, avevano chiaramente dimostrato che non era tecnicamente possibile ottenere la qualità indispensabile e margini adeguati quando il segnale dagli stadi fosse stato trasmesso con le potenze fornite dalle stazioni ECS della serie ITA, in dotazione al pool RAI-TELESPAZIO, indipendentemente dalle dimensioni delle antenne riceventi.

Il satellite Olympus invece presenta in ricezione un G/T migliore di 4 dB rispetto all'ECS; era inoltre possibile progettare una stazione trasportabile con EIRP adeguata e l'esempio era fornito dalla TDS-5 costruita dalla Selenia Spazio, su ordine ESA, per esprerimenti e dimostrazioni nel pacco di diffusione diretta a 12 GHz di Olympus (canale 20 a copertura europea), con segnali analogici secondo lo standard MAC.

Il transponder del canale 24 del satellite Olympus, usato per la sperimentazione, ha una frequenza in salita di 17,768 GHz, una frequenza di discesa di 12,168 GHz, un fattore G/T = 6 dB/K e una EIRP di 63,3 dBW. per una descrizione più dettagliata si rimanda al numero speciale di questa rivista sul satellite Olympus.

4. Stazioni mobili

Le peculiarità di una stazione mobile sono tutte riconducibili all'esigenza di contenere peso e dimensioni del mezzo al fine di favorirne le qualità operative e funzionali.

L'antenna, per esempio, se fatta di un disco parabolico intero, deve avere un diametro limitato dalla soluzione adottata per la sua posizione in condizione di trasporto, e sarà comunque compatibile con la sagoma di ingombro del mezzo, stabilita dalla regolamentazione dei trasporti su strada.

Anche le soluzioni possibili al problema dell'alimentazione della stazione saranno condizionate alle esigenze di maneggevolezza del mezzo, infatti la necessità di installare tubi di trasmissione di elevata potenza per compensare la relativa piccolezza dell'antenna, molto spesso non consente di progettare un mezzo autosufficiente in termini di alimentazione di energia elettrica.

Nel caso della stazione mobile RAI per Olympus, queste esigenze hanno portato ad una realizzazione con le seguenti caratteristiche:

— la stazione è integrata con l'automezzo IVECO 145/17;
— tutti gli apparati sono alloggiati in unico locale con l'eccezione degli amplificatori di ricezione a basso rumore;
— la lunghezza totale del mezzo contenuta in 9,1 metri;
- l'antenna ha diametro 3,3 metri con illuminazione tipo Cassegrain ed è montata su una piattaforma girevole che consente un movimento di azimuth di ±110°;
— non ci sono parti da smontare;
— l'energia elettrica 380 Volt/50 Hz trifase deve essere fornita dall'esterno, rete o complesso di continuità.

La stazione mobile della RAI è la prima stazione conosciuta al mondo, concepita per trasmettere i segnali numerici a 18 GHz. Può lavorare in Europa e nel Nord Africa da tutte le località entro la regione coperta dall'antenna ricevente del satellite (vedi fig. 5 della bibl. 3), è in grado di trasmettere ad entrambi i canali di diffusione diretta di Olympus e, per quanto fattibile, anche ad altri satelliti per DBS funzionanti secondo il Piano WARC '77; inoltre può ricevere qualunque canale DBS del Piano su entrambi i sensi di polarizzazione.

Si è già accennato al fatto che la stazione trasportabile è stata studiata e progettata per l'utilizzazione nella trasmissione di segnali numerici, mentre la stazione fissa, inizialmente concepita per la trasmissione di segnali TV/FM, è stata adattata in modo che le prestazioni finali consentissero condizioni di trasmissioni compatibili con le specifiche del modulatore-demodulatore a 70 Mbit/s di cui la stazione doveva essere equipaggiata.

Vediamo quindi il funzionamento del modem impiegato.

5. Il modem

Come già accennato per la trasmissione del segnale HDTV via Olympus è stata adottata la modulazione QPSK, ad un bit rate di 70 Mbit/s (69,870 Mbit/s, per la precisione).

Lo spettro del segnale modulato ha una banda a 3 dB di circa 40 MHz; la catena stazione trasmittente — satellite — stazione ricevente deve comunque avere una banda passante superiore (anche in previsione dell'uso per servizi diversi).

Il canale di trasmissione si può considerare non distorcente se la risposta d'ampiezza e il ritardo di gruppo sono costanti su una banda che, per il caso del QPSK, si può assumere larga come metà della frequenza associata al bit rate trasmesso. In particolare la piattezza in banda può essere quantificata in qualche decimo di decibel, e il ripple sul ritardo di gruppo in una frazione del tempo di simbolo.

Il modulatore riceve in ingresso due flussi di dati in formato HDB3, codifica di linea che permette di inglobare i dati e il clock, in un unico segnale. Ciascuno dei due flussi in ingresso ha un bit rate di 34,368 Mbit/s, compatibile con le reti numeriche in gerarchia e con evidenti semplificazioni nel trasporto terrestre del segnale digitale. All'interno del modulatore i due flussi vengono multiplati in una trama da un circuito con memoria elastica utilizzato anche per compensare il jitter della temporizzazione dei segnali in arrivo, spesso presente dopo il transito su reti di terra.

La frequenza della portante è 140 MHz; il filtraggio è del tipo coseno rialzato con roll-off 50% ripartito egualmente tra trasmissione e ricezione.

ITALIA '90: STAZIONI TRASMITTENTI DI SEGNALI HDTV NUMERICI VIA SATELLITE OLYMPUS

Il circuito di recupero della portante, utilizzata per la demodulazione coerente, ha un campo di aggancio di ±1,1 MHz, valore che impone un vincolo sulla tolleranza di frequenza del segnale ricevuto, e quindi sulla stabilità degli oscillatori di conversione di tutta la catena trasmissiva.

L'uscita del demodulatore fornisce due segnali a 34 Mbit/s con formato HDB3.

6. Adattamento delle stazioni di terra alle trasmissioni numeriche

Per le due stazioni si sono quindi potuti applicare criteri comuni di progetto e di intervento che si possono riassumere nei punti seguenti:

— ingresso e uscita IF delle stazioni a 140 MHz per consentire l'impiego del modem citato;
— banda passante e ritardo di gruppo delle catene di trasmissione e ricezione (IF-RF-IF) devono rispondere alle seguenti specifiche:

banda passante: 80 MHz

risposta di ampiezza	entro ± 0,4 dB nella banda Fo ± 20 MHz
	entro ± 0,7 dB nella banda Fo ± 36 MHz
ritardo di gruppo	entro 4 ns_{pp} nella banda Fo ± 18 MHz
	entro 8 ns_{pp} nella banda Fo ± 36 MHz

— alta stabilità delle conversioni di frequenza; per il rumore di fase si assumono le seguenti specifiche:

< – 60 dBc/Hz a 500 HZ   < – 90 dBc/Hz a 100 kHz

— particolare attenzione è stata posta nell'assicurare un funzionamento in zona lineare della catena trasmittente sino all'ingresso del tubo amplificatore di potenza finale in modo da rendere la dispersione dello spettro del segnale irradiato dipendente solo dal punto di lavoro del klystron, controllando la situazione di interferenza nei canali di salita adiacenti;
— possibilità di inserire un filtro di canale a frequenza centrale 17,768 GHz tra l'amplificatore finale e l'antenna per limitare le interferenze sui canali adiacenti, in particolare sui canali 22 e 26, occupati sulla up-link dai segnali del satellite tedesco TV-SAT. La risposta del filtro deve risultare:

1 dB a ± 20 MHz;   3 dB a ± 25 MHz;   20 dB a ± 38 MHz

Dalle prove preliminari il filtro di uscita, nel caso della stazione di Roma, è risultato inutile in quanto la potenza in salita necessaria per garantire i margini richiesti per l'intero collegamento era ottenuta con l'amplificatore di potenza funzionante in zona lineare. Al contrario, nel caso della stazione mobile, il filtro di uscita risultava opportuno in considerazione della minore EIRP, o potenza irradiata, disponibile, e per questa ragione è stato inserito con possibilità di esclusione;
— equipaggiamento aggiuntivo con strumenti di monitoraggio della qualità del collegamento numerico.

7. Specifiche della stazione mobile:

Banda di frequenza di trasmissione		17,3 – 18,1	GHz
Banda di frequenza di ricezione		11,7 – 12,5	GHz
Frequenza intermedia		70 e 140	GHz
Presintonie		canali 20, 24, 28 WARC '77	
Stabilità di frequenza		10^{-7}/mese	
Frequenza di traslazione del TLT		5600	MHz
EIRP portante singola (modo A)		85	dBW
EIRP di ciascuna delle due portanti (modo B)		79	dBW
Spurie fuori canali		< 10	dBW/MHz
G/T a 11,7 GHz e cielo chiaro		25	dB/K
Polarizzazione TX		circolare doppia	
Polarizzazione RX		circolare doppia	
Isolamento tra le polarizzazioni		30	dB
Diagramma	$1° < \phi < 36°$	$29 - 25 \log\phi$	dBi
di irradiazione TX	$\phi > 36°$	– 10	dBi
Diagramma	$1° < \phi < 36°$	$32 - 25 \log\phi$	dBi
di irradiazione RX	$\phi > 36°$	– 7	dBi
Movimento EL		0° ÷ 60°	
Movimento AZ		± 110°	
Larghezza di banda	senza filtro	80	MHz
	con filtro	50	MHz
Conversione AM/PM	catena TX	< 5	°/dB

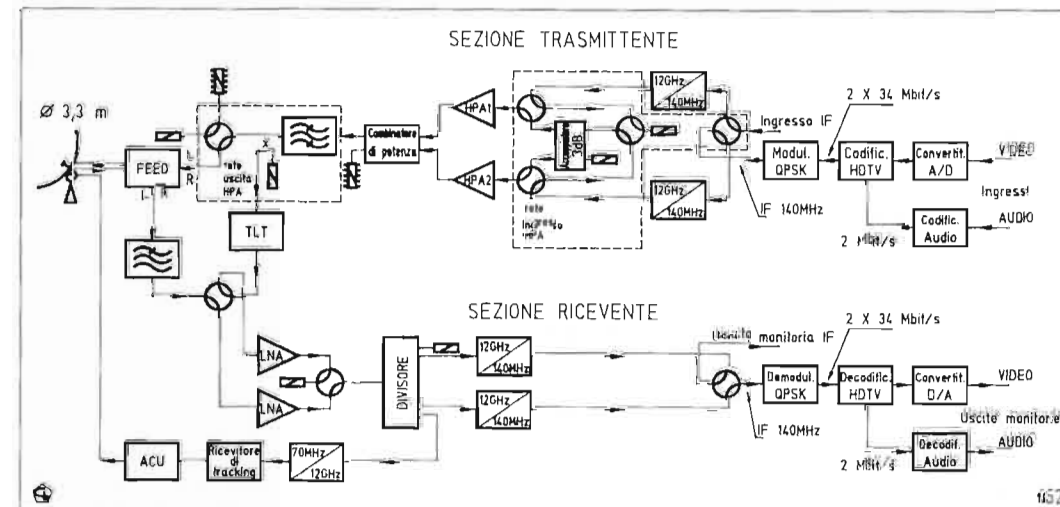



Fig. 2 — Schema a blocchi della stazione trasportabile.

8. Schema a blocchi della stazione mobile

In figura 2 è riportato lo schema a blocchi semplificato della stazione mobile.

Gli ingressi analogici video e audio, dopo opportuna equalizzazione, vengono inviati ai rispettivi convertitori A/D e quindi alla catena di codifica e modulazione numerica.

Il segnale in uscita dal modulatore QPSK a frequenza 140 MHz può essere, tramite opportuno deviatore nella rete di ingresso HPA, instradato verso l'uno o l'altro dei convertitori in salita 140 MHz/12 GHz a sintesi di frequenza. La catena di trasmissione già a questo punto mostra la ridondanza 1+1. Le uscite del convertitore di frequenza possono essere alternativamente instradate all'ingresso di un accoppiatore 3 dB, le cui due uscite alimentano i due amplificatori di alta potenza (HPA) di cui la stazione è fornita. La regolazione dei livelli nei singoli stadi della catena di trasmissione sino a questo punto deve essere tale da garantire un funzionamento in zona lineare. I due amplificatori di alta potenza HPA 1 e HPA 2, ciascuno con potenza massima di uscita pari a 1350 watt, possono essere in uscita combinati in fase per dare il massimo di EIRP disponibile su portante singola (questa configurazione riportata nel paragrafo precedente è descritta come modo A). In questa configurazione i due tubi a klystron sono posti in parallelo e ciò si ottiene agendo su di un regolatore di fase inserito all'ingresso di uno dei due amplificatori di potenza e non riportato per semplicità nello schema a blocchi. In caso di perdita di un HPA il combinatore di potenza è automaticamente by-passato e la perdita di potenza netta è di soli 3 dB (protezione *soft-fail*).

Un'altra configurazione è possibile, descritta come modo B: essa consente la trasmissione contemporanea di due portanti separate, ciascuna con potenza di circa 600 watt, ma con perdita della ridondanza. Infatti, i due upconverter 140 MHz/12 GHz sintonizzati su frequenze diverse sono separatamente alimentati da due segnali di frequenza intermedia e la rete di ingresso HPA consente di pilotare separatamente i due amplificatori di potenza. L'uscita del combinatore di potenza può essere chiusa su una terminazione per realizzare una situazione di stand-by, oppure può essere instradata verso l'antenna nella condizione di trasmissione.

Sul percorso in guida d'onda dal combinatore di potenza all'antenna è inseribile il filtro di canale a 18 GHz già descritto.

Tramite due accoppiatori direzionali in guida d'onda sono realizzati punti di prelievo del segnale per fornire sia una monitoria di potenza, sia il segnale di ingresso al così detto circuito TLT di prova.

La funzione del TLT è sinteticamente quella di convertire di frequenza i 18 GHz di uscita nel corrispondente canale nella banda di ricezione a 12 GHz e di attenuare il livello del segnale in modo da renderlo compatibile con l'ingresso di uno degli amplificatori a basso rumore di ricezione al fine di permettere un controllo della catena di trasmissione e di ricezione, esclusa l'antenna e il suo feed.

Proseguendo nella descrizione del circuito verso l'antenna lo schema a blocchi mostra simbolicamente la possibilità di trasmettere indifferentemente con polarizzazione circolare oraria o antioraria. L'antenna è una parabola del diametro di 3,3 metri in lastra di alluminio, illuminata con geometria tipo Cassegrain, i cui movimenti di elevazione e di azimuth sono controllabili da comandi manuali o asserviti alla ricezione del segnale di beacon trasmesso dal satellite Olympus a frequenza 12501,866 MHz. La stessa antenna riceve i segnali di ritorno dal satellite indifferentemente con la polarizzazione circolare destra o sinistra. Il segnale ricevuto di livello molto basso transita in un filtro rigetta-banda centrato alla frequenza di trasmissione; questo per impedire che la catena di ricezione venga saturata da un segnale ad alto livello. Il segnale ricevuto è presentato all'ingresso di uno dei due amplificatori a basso rumore in ridondanza 1 + 1. Successivamente un divisore di potenza invia il segnale a 12 GHz all'ingresso dei due convertitori di frequenza in discesa 12 GHz-140 MHz. Il segnale convertito alimenta la catena di demodulazione QPSK e di decodifica HDTV. Una adeguata strumentazione monitoria permette di valutare le prestazioni globali del sistema.

9. Specifiche della stazione fissa

Banda di frequenza di trasmissione		17,3 – 18,1	GHz
Banda di frequenza di ricezione		11,7 – 12,5	GHz
Frequenza intermedia		70	GHz
Presintonie		canali 20, 24, 28 WARC '77	
Stabilità di frequenza		± 10 kHz	
Frequenza di traslazione del TLT		5600	MHz
EIRP portante singola (modo A)		86	dBW
EIRP di ciascuna delle due portanti (modo B)		86	dBW
Spurie fuori canali		< 4	dBW/4 MHz
G/T a 11,7 GHz e cielo chiaro		32	dB/K
Polarizzazione TX		circolare doppia	
Polarizzazione RX		circolare doppia	
Isolamento tra le polarizzazioni		30	dB
Diagramma	$1° < \phi < 36°$	$29 - 25 \log \phi$	dBi
di irradiazione TX	$\phi > 36°$	– 10	dBi
Diagramma	$1° < \phi < 36°$	$29 - 25 \log \phi$	dBi
di irradiazione RX	$\phi > 36°$	– 10	dBi
Movimento EL		5° ÷ 65°	
Movimento AZ		± 60°	
Larghezza di banda	senza filtro	80	MHz
	con filtro	50	MHz
Conversione AM/PM	catena TX	< 5	°/dB

10. Schema a blocchi della stazione fissa

In figura 3 è riportato lo schema a blocchi semplificato della stazione fissa di Roma.

Come si può osservare, la stazione era composta da due parti interconnesse tra loro mediante collegamenti in fibra ottica: una, di generazione vera e propria, situata nei pressi dello Stadio Olimpico; l'altra, con gli apparati di trasmissione, ricezione e controllo, all'interno del Centro di Produzione TV di via Teulada.

10.1 *Postazione Stadio Olimpico*

I segnali audio (3 canali: destro, sinistro e effetti) e video (Y, P_R, P_B e sincronismi a tre livelli) analogici di in-

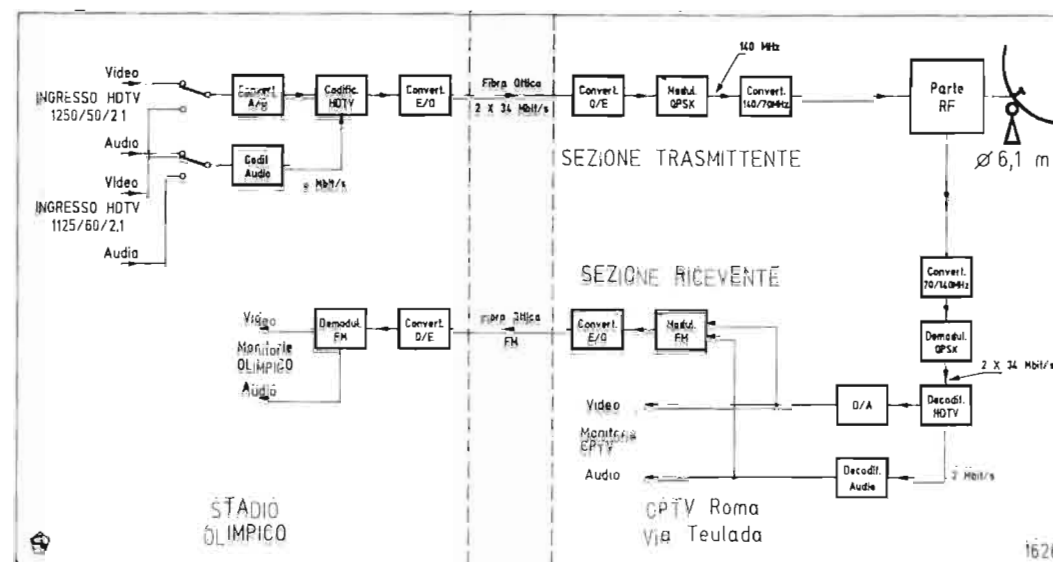



Fig. 3 — Schema a blocchi della stazione fissa.

gresso relativi alle sorgenti con standard HDTV europeo o giapponese, dopo opportuna equalizzazione, venivano inviati rispettivamente al codificatore numerico a 2 Mbit/s e al convertitore A/D che alimentava il codificatore HDTV vero e proprio.

I due flussi a 34 Mbit/s, mediante collegamento in fibra ottica, erano inviati al CPTV RAI di via Teulada a Roma.

Il corretto inserimento dei segnali era controllabile mediante opportuna strumentazione audio/video, oltre che soggettivamente con monitor HDTV e casse acustiche. Mediante fibre ottiche modulate in frequenza, provenienti dalla stazione fissa del CPTV, era altresì possibile il controllo, alla postazione dello Stadio Olimpico, del segnale irradiato e ricevuto dal satellite Olympus con l'antenna del CPTV.

10.2 *Stazione fissa*

Come detto, la stazione fissa è la stessa utilizzata per le trasmissioni sperimentali in PAL di RAI-SAT, in cui al posto del modulatore MF era stato inserito il modulatore numerico a 70 Mbit/s e FI = 140 MHz. Poiché la stazione è stata costruita per funzionare con una FI a 70 MHz, è stato necessario interporre un convertitore di frequenza 140/70 MHz.

Mediante gli apparati della stazione di ricezione veniva alimentata la parte di controllo: il segnale FI a 70 MHz, dopo conversione a 140 MHz, entrava nel demodulatore a 70 Mbit/s che forniva in uscita i due flussi a 34 Mbit/s per il decodificatore HDTV.

Il convertitore D/A e il decodificatore audio a 2 Mbit/s fornivano i segnali analogici video e audio che erano controllabili in locale ed inviati alla sala controllo appositamente preparata in un locale del CPTV stesso.

Nello schema a blocchi di figura 3 la parte a radiofrequenza della stazione di salita di Roma è rappresentata da un semplice blocco perché, come già detto, le stazioni di terra hanno architetture molto simili tra loro, per cui anche per questa stazione varrebbe l'illustrazione fatta al punto 8 con alcune differenze specifiche che qui riportiamo.

I due amplificatori di alta potenza (1350 watt ciascuno come sulla stazione trasportabile) non sono combinabili in fase, ma essi operano nella configurazione ridondata, designata come modo A, il primo in linea ed il secondo in *stand-by*, oppure sommati e su frequenze distinte per la trasmissione simultanea di due portanti TV nella configurazione non ridondata, designata come modo B.

Fig. 4 — Apparati di codifica e controllo del segnale HDTV numerico presso lo Stadio Olimpico.

Stazione trasmittente fissa di Telespazio puntata verso il satellite Olympus e posta sull'edificio del Centro di Produzione TV della RAI a Roma. L'antenna ha un diametro di 6,1 metri, con illuminatore tipo Cassegrain, ed è munita di sistema automatico di puntamento del satellite.
La stazione, trasmittente nella banda di frequenze di 17 GHz, ha inoltre capacità di ricezione monitoria nella banda a 12 GHz. La stazione è stata costruita dalla Società SELENIA SPAZIO.

Anche in assenza di combinazione in fase, la EIRP di stazione risultante è pari a 86 dBW perché l'antenna di diametro 6,1 metri ha un guadagno in trasmissione pari a 59,6 dBi.

Analogamente alla stazione trasportabile anche per l'antenna della stazione fissa la geometria di illuminazione è di tipo Cassegrain.

Per quanto riguarda la ricezione nella stazione è installata un'unica catena monitoria.

11. Conclusioni e ringraziamenti

Si sono descritte le caratteristiche delle due stazioni di terra, fissa e mobile, operanti con il pacco di diffusione diretta del satellite Olympus, impiegate dalla RAI per il recente esperimento di trasmissione punto-multipunto di HDTV numerica.

Le stazioni hanno operato in maniera soddisfacente durante l'esperimento e gli autori non possono non ricordare la preziosa collaborazione prestata prima e durante la manifestazione degli Ingg. Francesco Fiorica, Carlo Scaffidi e Stefano Fioravanti della Società Selenia Spazio, costruttrice delle stazioni di terra, nonché dall'Ing. Massimo Pronti e dal Sig. Giuseppe de Mattia della Società Telespazio. (3931)

BIBLIOGRAFIA

1. - G. P. Pacini: *Stazione mobile per trasmissione a Olympus. Pacco 18-12 GHz*, «RAI-Centro Ricerche», Relazione Tecnica n. 88/14/I.

2. - G. Moro, G. Garazzino, M. Tabone: *Trasmissioni sperimentali QPSK a 34 e 70 Mbit/s via Eutelsat I*, «RAI-Centro Ricerche», Relazione Tecnica n. 90/10/I.

3. - G. P. Pacini: *Satellite Olympus-F1*, «Elettronica e Telecomunicazioni», n. 2/3, 1989.

ITALIA '90: POSTAZIONI RICEVENTI PER TRASMISSIONI PUNTO-MULTIPUNTO DI HDTV NUMERICA DA SATELLITE

M. ARIAUDO, G. CERRUTI, G. GARAZZINO*

SOMMARIO — Si descrivono le postazioni riceventi allestite dalla RAI in occasione dei Campionati Mondiali di Calcio «Italia '90» per la sperimentazione di HDTV numerica via satellite Olympus, con due diversi standard (1250 righe/50 Hz e 1125 righe/60 Hz).
Ogni postazione comprende una sezione a radiofrequenza (l'antenna parabolica e le due unità di conversione), attraverso la quale il segnale, modulato QPSK con un flusso a 70 Mbit/s, è traslato dalla frequenza di ricezione del canale 24 del satellite (12168, 62 MHz) alla frequenza intermedia di 140 MHz ed inviato al demodulatore. Da questo sono estratti due flussi a 34 Mbit/s dai quali il decodificatore HDTV ricostruisce il segnale video numerico e il flusso a 2 Mbit/s dei 3 canali audio numerici. Attraverso il decodificatore audio si ottengono i segnali audio analogici per gli altoparlanti. Analogamente, per il segnale video numerico si opera la conversione D/A e, per mezzo di due differenti matrici (50 Hz e 60 Hz), si ottengono i segnali R, G, B per il proiettore HDTV. A causa dell'ampia gamma di frequenze e delle speciali esigenze imposte dal segnale numerico, gli apparati costituenti le postazioni riceventi sono di notevole complessità e richiedono caratteristiche molto più severe di quelle dei ricevitori MF da satellite esistenti sul mercato. Perciò, per la maggior parte degli apparati (unità interna, decodificatore numerico, generatori di sincronismi, matrici, equalizzatori/distributori video), è stato necessario effettuarne la progettazione presso il Centro Ricerce RAI e coordinarne la realizzazione presso l'industria nazionale. È stato altresì necessario modificare i monitori HDTV di controllo per renderli adatti al funzionamento bistandard. Per gli apparati acquisiti all'esterno, si è invece resa necessaria una accurata selezione, con sofisticate misure volte a quantificare caratteristiche non specificate (stabilità di frequenza e rumore di fase, particolarmente importanti per i segnali numerici). Negli oltre 40 giorni di attività durante ***ITALIA '90****, il funzionamento delle otto stazioni riceventi, dislocate sul territorio nazionale, è risultato assolutamente soddisfacente ed affidabile.*

SUMMARY — ***Receiving stations for point-to-multipoint transmission of digital HDTV signals via satellite:*** *- The article describes the receiving stations properly equipped by RAI on the occasion of the FIFA World Cup 1990 (Italia '90) for the experiment of digital HDTV via the Olympus satellite, adopting two different formats (1250 lines/50 Hz and 1125 lines/60 Hz). Each station was equipped with a radiofrequency section (parabolic antenna and two conversion units), through which the QPSK-modulated signal at 70 Mbit/s is translated from the satellite channel 24 reception frequency (12168.62 MHz) to the 140 MHz intermediate frequency, and is sent to the demodulator. From the demodulator two 34 Mbit/s streams are extracted from which the HDTV decoder reconstructs the digital video signal and the 2 Mbit/s stream of the three digital sound channels. The analogue sound signals are obtained with the audio decoder and sent to the loudspeakers. Analogously, the D/A conversion is made for the digital video signal and, by means of two different matrices (50 Hz and 60 Hz) the signals R, G, B are obtained for the HDTV projector.*
Owing to the wide frequency range and to the particular requirements asked by the digital signal, the units of the receiving stations are very complex and require more severe characteristics than those of the satellite FM receivers currently on the market. Hence, for most of the equipment (internal unit, digital decoder, sync generators, matrices, video equalizers/distributors) it was necessary to make its design at the RAI Research Centre and to co-ordinate its implementation with the national industry. It was also necessary to modify the HDTV monitors so as to make them suitable for operating according to the two formats. Conversely, as regards the units bought outside an accurate selection was required, adopting sophisticated tests to quantify not specified characteristics (frequency stability and phase noise, particularly important for the digital signals). During more than 40 days at ***ITALIA '90*** *the operation of the eight receiving stations located over the national territory resulted to be completely satisfactory and reliable.*

1. Introduzione

Gran parte dell'impegno realizzativo inerente alla messa in opera dell'intero complesso di trasmissione e ricezione di segnali video numerici HDTV, realizzato dalla RAI in occasione dei Campionati Mondiali di Calcio del 1990 (bibl. 1), si è concentrato nelle postazioni riceventi.

Ciò è facilmente comprensibile se si considera che le

(*) Dott.sa Margherita Ariaudo, p.i. Giovanni Cerruti, p.i. Giorgio Garazzino del Centro Ricerche RAI - Torino.
Dattiloscritto pervenuto alla redazione il 18 ottobre 1990.

postazioni dovevano essere almeno otto ed i tempi realizzativi non erano superiori ai quattro mesi, entro i quali si doveva provvedere non solo all'assemblaggio degli apparati necessari, ma anche alla realizzazione degli apparati non ancora disponibili sul mercato.

Gli apparati di ricezione progettati e realizzati per l'occasione dal *Centro Ricerche* della *RAI* sono:

- per la sezione a radio frequenza, le unità interne;
- per il segnale video numerico, il convertitore D/A;
- per il segnale video di banda base, i generatori di sincronismi (PG), le matrici e, in parte, gli equalizzatori/distributori;
- gli apparati audio ausiliari.

Una notevole complicazione derivava dall'esigenza di poter lavorare indifferentemente sia a standard 50 Hz che 60 Hz. Questa esigenza ha inoltre richiesto modifiche circuitali dei monitori HDTV di controllo (monitori Sony), in quanto non disponibili con funzionamento bistandard.

La vasta gamma di frequenze dei segnali da trattare (dai 12 GHz della radiofrequenza ricevuta dal satellite, fino alla banda base del segnale video) e la presenza di segnali video sia numerici che analogici, ha comportato il coinvolgimento di una equipe assai eterogenea di specialisti.

Si è dovuto poi curare il coordinamento delle ditte esterne alle quali era demandata la realizzazione di vari apparati, frutto di reciproca collaborazione: particolarmente importante la collaborazione con la ditta Telettra. realizzatrice di uno degli apparati più complessi, il codecodificatore numerico HDTV, apparato la cui fattibilità era già stata dimostrata per simulazione presso il Centro Ricerche Rai, ma la cui complessità realizzativa richiedeva l'opera di una industria elettronica ai massimi livelli tecnologici.

2. Descrizione a blocchi della postazione ricevente

La postazione ricevente, come mostra lo schema a blocchi di figura 1, si articola in tre parti:

— l'antenna e l'unità esterna, alloggiate in luogo adatto alla ricezione del segnale del satellite;

— l'unità interna, il demodulatore QPSK, il decodificatore video numerico, il convertitore video D/A, il decodificatore audio numerico, le matrici 50 e 60 Hz, gli equalizzatori/distributori video, i PG a 50 e 60 Hz, i distributori audio, i pannelli di commutazione, il monitore ed il waveform monitor di controllo. Tutti questi apparati sono alloggiati su due rack posti in una saletta di regia;

— un apparato di proiezione video, i diffusori audio destro e sinistro e la catena di diffusori audio per l'effetto surround, posti nella sala visione.

Fig. 1 — Schema a blocchi della postazione ricevente.

Il segnale, modulato QPSK a 70 Mbit/s, più precisamente a 69,87 Mbit/s, è irradiato dal satellite alla frequenza di 12168,62 MHz (canale 24). A terra viene ricevuto dall'antenna e immediatamente convertito ad una prima FI di 1418,62 MHz per mezzo dell'unità esterna. Tale FI è più adatta ad alimentare il cavo coassiale di collegamento alla unità ricevente posta all'interno dell'edificio, collegamento che normalmente risulta di lunghezza non indifferente (molte decine di metri).

Il suddetto segnale a RF raggiunge la postazione ricevente ed entra nella unità interna, il cui compito è quello di convertire la prima FI di 1418,62 MHz in una seconda FI di 140 MHz, con caratteristiche di notevole stabilità di frequenza: compito non facile in considerazione del divario tra le due FI e della scarsa dinamica della frequenza di ingresso accettata dal successivo demodulatore QPSK.

Il processo di demodulazione è in questo caso particolarmente delicato, a causa del rumore e delle distorsioni sul collegamento.

Il demodulatore QPSK riceve il segnale alla seconda FI ed estrae due flussi di segnali numerici su linee coassiali parallele, ciascuno a 34 Mbit/s, più precisamente a 34,368 Mbit/s, coerentemente con la filosofia operativa del decodificatore video numerico RAI/Telettra.

Il decodificatore video numerico riceve i due flussi a 34 Mbit/s e provvede al complesso compito di ricostruire il segnale video numerico, in concordanza con quanto avvenuto nel corrispondente codificatore in trasmissione. Il segnale video decodificato esce ancora in forma numerica, con flusso parallelo a 54 MHz di clock. Dal decodificatore esce anche un flusso a 2 Mbit/s, più precisamente a 2,048 Mbit/s, relativo ai tre segnali audio numerici multiplati.

Si sottolinea che il decodificatore (così come il codificatore) è trasparente: accetta quindi segnali derivanti da entrambi gli standard video HDTV in esperimento.

Il segnale audio numerico a 2 Mbit/s uscente dal decodificatore HDTV Telettra perviene al decodificatore audio MSD-5, dal quale escono tre canali audio analogici in banda base: audio sinistro, audio destro e audio surround.

I singoli segnali audio, attraverso opportuni distributori e amplificatori, sono inviati agli amplificatori di potenza e alle unità di diffusione di sala visione, nonché agli altoparlanti monitoriali della saletta di regia.

Il Bus video numerico proveniente dal decodificatore Telettra è inviato al convertitore D/A. Dopo la conversione si hanno a disposizione i segnali video in banda base in forma di componenti Y, R-Y, B-Y, nonché i sincronismi H e V. Sul convertitore A/D è presente un deviatore tramite il quale l'apparato viene predisposto al trattamento di segnali video a standard 1250/50 oppure 1125/60.

I segnali in componenti vengono immediatamente convertiti in segnali R, G, B per mezzo di due differenti matrici (50 Hz, 60 Hz). Le due matrici si rendono necessarie a causa della diversa colorimetria esistente tra i due standard HDTV da trattare.

I tre segnali R, G, B uscenti dalle matrici costituiscono i segnali video ad alta definizione di fine catena, usufruibili da qualsiasi tipo di display. Come tali vengono distribuiti a tutti gli utilizzatori, per mezzo di equalizzatori/distributori a larga banda (30 MHz).

Dato che i segnali R, G, B sono privi di sincronismi, è necessario provvedere alla sincronizzazione degli utilizzatori per mezzo di segnali di sincronismo separati, nella forma H e V oppure SS. Ciò richiede una ulteriore estensione dell'impianto con l'adozione di due generatori di sincronismi (PG), uno per lo standard 50 Hz ed uno per lo standard 60 Hz, funzionanti in condizione di genlock, ottenuta utilizzando ovviamente i segnali H e V ricevuti. Inoltre all'interno dei PG esiste un generatore di segnali barre e graticcio, nella forma R, G, B, che risultano assai utili per l'allineamento dei proiettori di sala.

Come già detto, la postazione deve poter funzionare indifferentemente a standard 1250/50 e 1125/60: ciò pone l'esigenza di commutare alcune linee video. Il problema è stato risolto con l'adozione di un semplice pannello di commutazione a ponticelli coassiali, commutabili manualmente.

3. Antenna Ricevente

L'antenna (bibl. 2) è formata da un riflettore parabolico con illuminatore centrato a flangia corrugata, che garantisce una elevata discriminazione di polarizzazione.

I parametri principali dell'antenna, che intervengono nel dimensionamento della postazione ricevente, sono il guadagno e la temperatura di rumore. Il guadagno, che esprime il rapporto tra il flusso di potenza dell'antenna in esame e quello del radiatore isotropico, dipende dall'area efficace e dalla frequenza di funzionamento. La temperatura di rumore definisce la densità spettrale del rumore raccolto dall'antenna, al quale contribuiscono il rumore di cielo (rumore cosmico di cielo chiaro e rumore per assorbimento dovuto a eventi atmosferici), che dipende dall'angolo di elevazione dell'antenna ricevente, e il rumore di terra, dovuto all'irraggiamento del suolo.

Il fattore determinante nella scelta dell'antenna resta comunque il diametro del riflettore (che ne determina il guadagno) per il quale non è possibile superare certi limiti per considerazioni di stabilità meccanica e di semplicità di installazione.

Per determinare il diametro dell'antenna ricevente è necessario considerare il fattore di merito G/T della postazione ricevente, rapporto tra il guadagno dell'antenna ricevente e la temperatura di rumore del ricevitore in °K (gradi Kelvin), secondo l'espressione:

$$G/T = G/(T_a + (F - 1) \cdot T_0) \quad [1]$$

dove G è il guadagno e T_a la temperatura di rumore dell'antenna ricevente, F è la cifra di rumore del ricevitore, $T_0 = 290\,°K$.

Quanto maggiore è il guadagno dell'antenna e quanto minore è il rumore generato nel ricevitore, tanto maggiore è il fattore di merito.

Poiché nella [1] interviene il parametro F, cifra di rumore del ricevitore, che dipende fortemente dalle caratteristiche dell'unità esterna, si passa all'esame della stessa; successivamente, con i parametri ad essa relativi e con il valore di fattore di merito richiesto, sulla base del bilancio del collegamento (bibl. 3) si potrà procedere al calcolo del diametro dell'antenna.

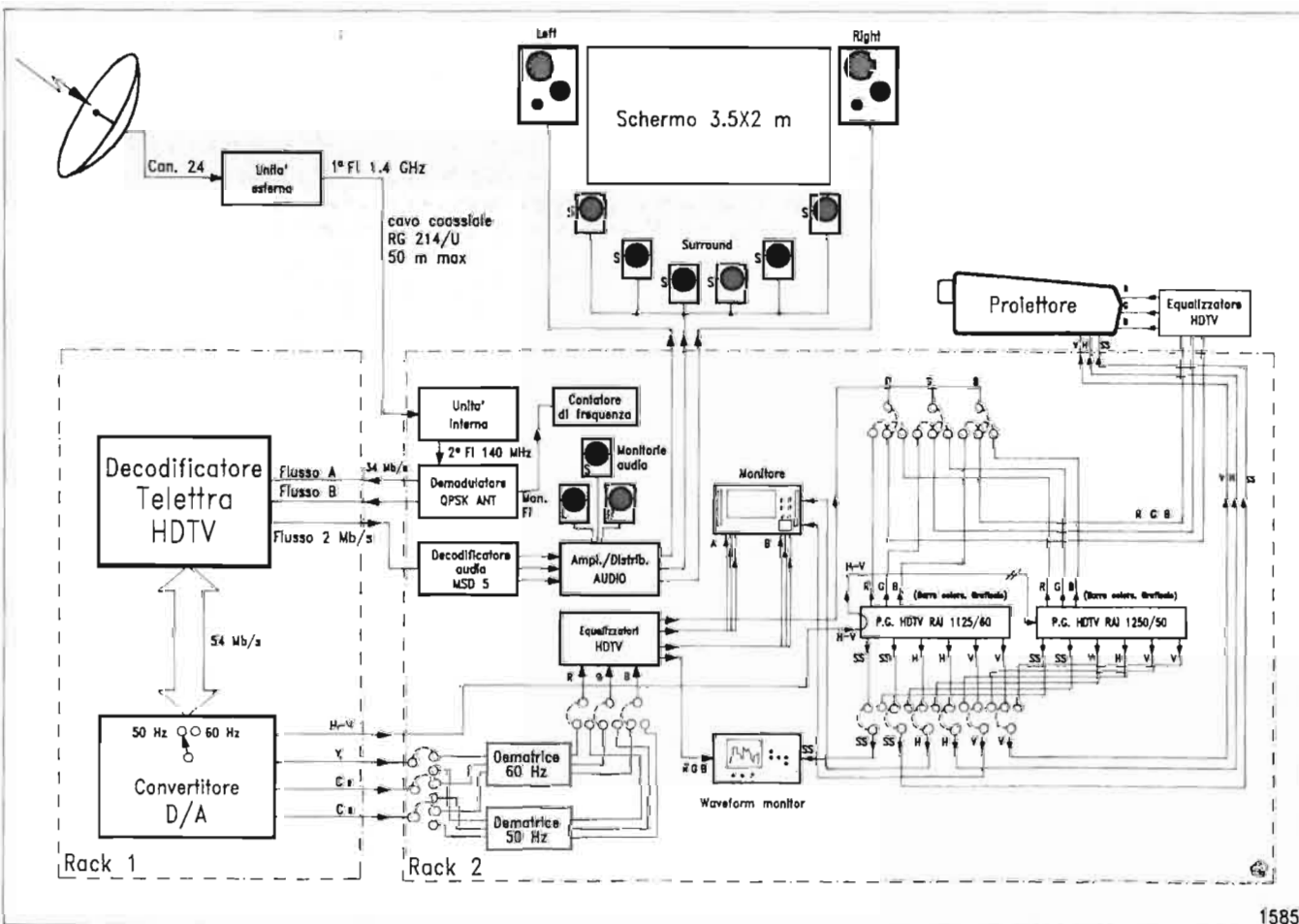
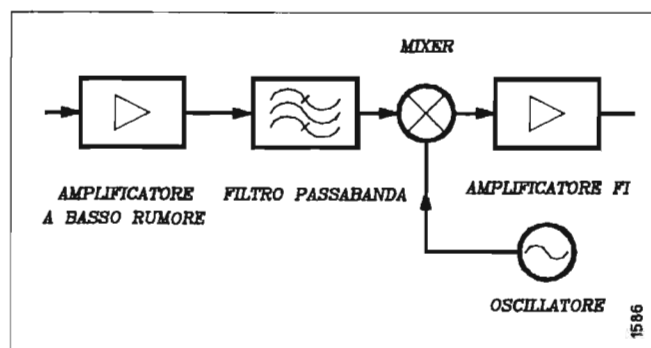



Fig. 2 — Schema a blocchi del convertitore a microonde dell'unità esterna.

4. Unità esterna

L'unità esterna è costituita dal convertitore a microonde, posto immediatamente dietro l'illuminatore dell'antenna, con la funzione di amplificare il segnale ricevuto da satellite e trasferire il medesimo dalla frequenza di ricezione RF a 12 GHz, alla prima frequenza intermedia a 1,4 GHz, dove è introdotta una ulteriore amplificazione.

Il convertitore, rappresentato schematicamente in figura 2, è costituito da un amplificatore a basso rumore, da un mescolatore (o convertitore propriamente detto) con il relativo oscillatore locale, seguito da un amplificatore alla prima frequenza intermedia. Tra l'amplificatore a basso rumore e il mescolatore è inserito un filtro passabanda per l'attenuazione del segnale immagine e per ridurre la reirradiazione dell'oscillatore locale.

I parametri che contraddistinguono il convertitore sono il guadagno, la cifra di rumore, la stabilità della frequenza del segnale convertito al variare delle condizioni ambientali, il rumore di fase.

Il guadagno complessivo è dato dalla somma dell'amplificazione a microonde e di quella a frequenza intermedi, però la prima è di gran lunga la più importante e la più critica. Infatti ogni amplificatore aggiunge al segnale e al rumore presenti al suo ingresso, un rumore interno generato dai dispositivi che lo compongono. Pertanto l'amplificatore a microonde, primo componente del convertitore, deve avere una cifra di rumore bassa e deve amplificare il segnale ricevuto di un valore sufficiente affinché il contributo del rumore generato nella catena a valle sia trascurabile e non degradi la qualità del segnale.

La cifra di rumore dell'amplificatore determina, in massima parte, la cifra di rumore del convertitore completo. Infatti, in una cascata di sottosistemi come quella di figura 2 risulta:

$$[2] \qquad F = F_1 + (F_2 - 1)/G_1 + (F_3 - 1)/(G_1 \cdot G_2)$$

dove F_1 e G_1 sono i parametri dell'amplificatore a microonde; F_2 e G_2 quelli del mixer ($F_2 = L_2$, essendo L_2 la perdita di conversione del mixer), F_3 la cifra di rumore dell'amplificatore FI.

Quindi, tanto più elevato è il guadagno dell'amplificatore a microonde, tanto più la cifra di rumore globale del convertitore si avvicina a quella dell'amplificatore isolato.

Se il guadagno e la cifra di rumore del ricevitore sono parametri tradizionalmente determinanti per il bilancio di un collegamento via satellite, il rumore di fase e la stabilità di frequenza sono parametri specialmente importanti nel caso di segnali numerici a modulazione PSK, in quanto l'informazione è legata alla fase del segnale trasmesso e la variazione di frequenza all'ingresso del demodulatore non deve superare certi limiti prestabiliti.

Perciò, mentre la ricezione da satelliti a diffusione diretta (DDS) di segnali codificati PAL o MAC è ormai possibile su vaste aree, con buona qualità, pur impiegando sistemi riceventi di medie caratteristiche (antenne di diametro 90 cm o meno e unità esterne con 2 dB di cifra di rumore, senza particolari esigenze di stabilità e di rumore di fase) (bibl. 4), nel caso di segnali HDTV a modulazione numerica è necessario avere caratteristiche migliori sia come guadagno e cifra di rumore, ma soprattutto come stabilità della frequenza del segnale e del rumore di fase introdotto nella conversione.

Le unità esterne reperibili sul mercato (bibl. 5) sono in maggior parte prodotte in Giappone, anche se commercializzate in Europa sotto diverse marche, ed hanno caratteristiche adeguate per la ricezione DDS, per la quale è sufficiente una stabilità di frequenza di $\pm 3 \cdot 10^{-4}$ e non vi sono particolari esigenze per il rumore di fase.

Per questo motivo, le unità esterne impiegate nelle postazioni riceventi sono state individuate in seguito ad una accurata indagine di mercato, che ha permesso di scegliere, tra le numerose esistenti, quelle meglio rispondenti alle esigenze sopraddette.

Fig. 3 — Antenna ricevente ed unità esterna della postazione ricevente a Palazzo Labia (Venezia).

Tabella 1.
CARATTERISTICHE MISURATE DELLE UNITÀ ESTERNE

Guadagno	:	53 ÷ 55 dB
Cifra di rumore	:	1,3 ÷ 1,4 dB
Rumore di fase SSB a 10 KHz	:	– 81 dBc/Hz max
Offset di frequenza	:	± 1 MHz
Deriva di frequenza		
da – 40 a + 50 °C:		1,5 MHz max
da + 20 a + 50 °C:		0,5 MHz max

È stata fatta una accurata verifica delle caratteristiche con l'impiego di speciale strumentazione di misura. Per la misura della stabilità di frequenza è stato effettuato il monitoraggio continuo, sottoponendo le unità esterne a cicli termici automatici in camera climatica (bibl. 5), per stabilire in termini quantitativi, per ogni esemplare, la deriva di frequenza nell'intervallo di temperatura prevedibile per le condizioni ambientali di impiego.

I risultati delle misure di circa 20 esemplari presentano bassa dispersione, essendo contenuti nei limiti dei valori riportati in tabella 1; si rileva, inoltre, un offset rispetto al valore nominale della frequenza, di entità compresa entro ± 1 MHz. Perciò ogni unità è corredata delle specifiche misure ad essa relative, per consentire di recuperare tale deviazione mediante i circuiti all'uopo predisposti nell'unità interna.

Considerate le caratteristiche delle stazioni trasmittenti (bibl. 6) e quelle del pay-load su satellite, la valutazione del bilancio del collegamento (bibl. 3) per trasmissione immune da errori richiede un rapporto portante/rumore, relativo alla tratta di discesa, corrispondente ad un fattore di merito della postazione ricevente G/T di 20,7 dB/°K.

Pertanto, con i dati dell'unità esterna suddettti, è ora possibile, dalla [1], ricavare il guadagno dell'antenna ricevente.

Risulta:

$$[3] \qquad G = G/T \cdot (T_a + (F - 1) \cdot T_0)$$

da cui, per G/T = 20,7 dB/°K, $T_0 = 290$ °K, $T_a = 85$ °K, F = 2 dB (1,4 dB è la cifra di rumore del convertitore, 0,6 dB sono le perdite introdotte dalle connessioni) si ricava G = 44,7 dB, corrispondente, assumendo una efficienza di 0,6, ad una antenna con riflettore di diametro 1,75 metri, per cui si assume come valore definitivo 1,8 metri. è da notare che questo valore deriva dalla necessità di avere un margine molto ampio per garantire l'efficienza del collegamento, con altissimo grado di probabilità, anche in caso di condizioni meteorologiche avverse.

Le misure effettuate (bibl. 7) e soprattutto il perfetto e corretto funzionamento delle postazioni riceventi per tutta la durata dei Campionati mondiali, anche con forte temporale con grandine, confermano la validità di quanto detto.

A riprova sta il fatto che, nel punto di ricezione presso il *Centro Ricerche* RAI, è stata usata sperimentalmente anche un'antenna del diametro di 70 cm con cielo chiaro; si aveva ancora un margine di circa 3 decibel.

5. Unità interna

Durante la fase preparatoria di studio delle postazioni riceventi e di sperimentazione preliminare, è stata esaminata la possibilità di utilizzare unità interne di tipo commerciale, eventualmente apportando le opportune modifiche: questa soluzione avrebbe avuto il vantaggio di consentire un risparmio non indifferente in termini di tempo e di risorse umane.

Però nessuno degli apparati esaminati si è rivelato adatto al particolare tipo di segnale da ricevere ed è stato di conseguenza indispensabile, da parte del *Centro Ricerche* della RAI, affrontare dapprima la progettazione e la costruzione di un prototipo, da sottoporre ad una serie di test che ne dimostrassero la piena funzionalità e rispondenza alle caratteristiche richieste, e in seguito la costruzione e la taratura di una piccola serie di 10 esemplari.

Durante il periodo di progettazione e sperimentazione iniziale in laboratorio, si è rivelato indispensabile l'utilizzo del «simulatore di satellite», realizzato precedentemente dal *Centro Ricerche* della RAI. Il simulatore ha consentito di riprodurre in un banco di misura, con ottima approssimazione, come si è riscontrato in seguito, le condizioni presenti sul collegamento reale via satellite per quanto riguarda il rumore e le distorsioni.

I severi requisiti imposti in sede di progettazione dell'unità interna dalla modulazione QPSK a 70 Mbit/s erano i seguenti:

- elevata larghezza di banda, in modo che su tutto il collegamento, fino all'ingresso del demodulatore, l'unica limitazione fosse in pratica quella costituita dal filtro I-MUX del transponder del satellite Olympus (banda di 42 MHz a – 3 dB);
- ridottissimo ritardo di gruppo in una banda di almeno 35 MHz;
- elevata stabilità di frequenza e minimo rumore di fase dell'oscillatore locale di conversione.

In base a tali requisiti è stata realizzata l'Unità Interna RAI ST/RS tipo 9305, della quale nel seguito vengono descritte le funzioni svolte, le caratteristiche e le prestazioni, che sono riportate in tabella 2.

La figura 4 mostra la vista frontale dell'apparato, mentre il suo circuito a blocchi è rappresentato in figura 5.

5.1 CONVERSIONE DI FREQUENZA

La funzione principale dell'unità interna è la conver-

Tabella 2.
PRINCIPALI CARATTERISTICHE DELL'UNITÀ INTERNA

Frequenza d'ingresso (1ª FI)	:	1418,62 MHz
Livello d'ingresso minimo	:	– 46 dBm
Livello d'ingresso massimo	:	– 26 dBm
Impedenza d'ingresso	:	50 Ω
Frequenza di uscita (2ª FI)	:	140 MHz
Livello di uscita	:	– 13 dBm
Impedenza di uscita	:	75 Ω
Guadagno	:	33 dB
Risposta di ampiezza nella banda di ± 30 MHz	:	± 0,5 dB max
Ritardo di gruppo nella banda di ± 17,5 MHz	:	5 ns max

Fig. 4 — Vista frontale dell'Unità Interna RAI ST/RS tipo 9305.

sione di frequenza del segnale proveniente dall'unità esterna: il segnale dalla 1ª FI (1418,62 MHz) viene convertito alla 2ª FI (140 MHz).

La conversione è effettuata in un unico passo, con oscillatore locale ad una frequenza 140 MHz più bassa del segnale entrante, in modo che non vi sia inversione dello spettro.

Poiché nella modulazione QPSK l'informazione trasmessa è associata alle quattro diverse fasi che può assumere il segnale modulato, ai fini delle prestazioni del sistema ricevente è essenziale che nel processo di conversione vi sia un contributo trascurabile del rumore di fase da parte dell'oscillatore locale: l'oscillatore utilizzato nell'unità interna in oggetto ha buone caratteristiche a questo riguardo ed è un oscillatore sintetizzato con VCO e PLL, realizzato dalla ditta Teko-Telecom. Il suo rumore di fase su singola banda laterale è migliore di −85 dBc/Hz a 10 KHz: con questo valore le prestazioni del ricevitore non sono degradate in modo apprezzabile.

Come è stato detto nel capitolo 4, le unità esterne utilizzate per le postazioni riceventi per HDTV numerica sono di tipo commerciale per DDS e, pur essendo già state accuratamente misurate e selezionate, presentano un offset della frequenza di uscita (1ª FI) che varia, rispetto al valore nominale, da esemplare ad esemplare e risulta al massimo di ± 1 MHz (tabella 1); per di più la frequenza dipende anche dalle variazioni termiche, con una variazione massima di 0,5 MHz passando da + 20 °C a + 50 °C (tabella 1).

A sua volta il successivo demodulatore QPSK accetta variazioni della frequenza del segnale d'ingresso che non devono superare ± 1 MHz, secondo quanto viene indicato dalla casa costruttrice e confermato da prove di laboratorio.

Di conseguenza è risultato necessario fornire l'unità interna di un comando che consenta di compensare opportunamente, nell'ambito indicato, le variazioni di frequenza introdotte dall'unità esterna.

La soluzione adottata, preferita ad altre per ragioni sia di urgenza, sia di praticità di impiego, è stata la predisposizione di un commutatore che, intervenendo manualmente sulla frequenza dell'oscillatore locale, consente di variare la frequenza a scatti di 500 KHz, fino ad un massimo di ± 6 MHz rispetto al valore nominale (140 MHz).

La corretta regolazione viene fatta leggendo su un contatore la frequenza della portate ricostruita all'interno del demodulatore QPSK, il cui valore è lo stesso del segnale modulato d'ingresso: in questo modo la frequenza del segnale all'ingresso del demodulatore può essere contenuta entro uno scarto massimo di 250 KHz dal valore nominale.

È tuttavia da notare che, in pratica, per tutta la durata dell'esperimento non è stato necessario alcun intervento manuale.

Fig. 5 — Schema a blocchi dell'Unità Interna RAI ST/RS tipo 9305.

5.2 Alimentazione della unità esterna

L'unità interna è in grado di alimentare l'unità esterna attraverso il connettore d'ingresso e il cavo coassiale di discesa.

È stata scelta allo scopo la tensione di ± 15 V, che viene fornita e mantenuta stabilizzata da un regolatore di tensione.

Con tale tensione è anche possibile alimentare amplificatori supplementari, che servivano a compensare la maggiore attenuazione introdotta da ulteriori spezzoni di cavo, nell'eventualità che in qualche installazione i 50 metri di cavo previsti in sede di progetto risultassero insufficienti.

Un deviatore permette di inserire, od escludere, la tensione di alimentazione all'unità esterna: le due condizioni sono segnalate da indicatori a LED.

5.3 Amplificazione

La determinazione del guadagno complessivo dell'unità interna è stata fatta in base ai seguenti parametri:

- minimo livello d'ingresso alla 1ª FI (che dipende dal flusso a terra nel punto di ricezione più sfavorito, dal diametro dell'antenna e dal guadagno dell'unità esterna);
- attenuazione del cavo coassiale tra unità esterna e unità interna;
- livello d'ingresso al demodulatore QPSK.

L'amplificazione richiesta all'unità interna deve anche compensare le perdite di inserzione dei filtri e la perdita di conversione del mixer ed è ripartita tra la 1ª FI, con un amplificatore che copre l'intera banda 0,95 ÷ 1,75 GHz con guadagno di circa 17 dB, e la 2ª FI, con un amplificatore di uscita a 140 MHz con guadagno di circa 30 dB.

In questo modo l'amplificazione tra l'ingresso alla 1ª FI e l'uscita a 140 MHz è di circa 33 dB, che assicurano alcuni decibel di margine rispetto al valore normalmente necessario.

Il livello di uscita a 140 MHz dell'unità interna deve essere mantenuto costantemente al valore di − 13 dBm su 75 Ohm, richiesto all'ingresso del successivo demodulatore QPSK, compensando sia le variazioni del segnale ricevuto dal satellite, sia, per le differenze fra le caratteristiche dei vari punti riceventi, i diversi guadagni delle unità esterne e le differenti attenuazioni dei cavi coassiali.

A questo scopo, l'amplificatore a 140 MHz comprende un circuito di controllo automatico di livello: esso è costituito da un attenuatore variabile a diodi PIN, comandato da un circuito che rivela il livello del segnale di uscita e ne ricava una tensione di errore.

5.4 Allarmi

L'unità interna è fornita di alcuni indicatori a LED che segnalano condizioni di funzionamento anomalo; essi sono:

- assenza di alimentazione all'unità esterna:
- livello RF scarso o eccessivo: le due spie si accendono rispettivamente allorché, in conseguenza di valori non corretti del livello d'ingresso alla 1ª IF, il livello di uscita a 140 MHz scende al di sotto di − 15 dBm o aumenta oltre −12 dBm. Esiste comunque ancora un margine di sicurezza al di là di questi limiti, in quanto il campo di funzionamento del demodulatore QPSK va da − 10 a −23 dBm;
- aggancio del PLL dell'oscillatore locale: la spia si accende quando il PLL non è correttamente agganciato, il che comporta instabilità della frequenza di uscita.

5.5 Caratteristiche di ampiezza e di ritardo di gruppo

In sede di progettazione si è tenuto conto che la larghezza di banda dell'intero collegamento deve essere limitata essenzialmente dal filtro I-MUX del transponder del satellite Olympus: circa 42 MHz a − 3 dB.

La larghezza di banda dell'unità interna deve essere maggiore per quanto possibile di questo valore, in modo da non introdurre distorsioni apprezzabili sul segnale numerico nel canale RF, anche in conseguenza degli scarti della frequenza del segnale entrante alla 1ª FI dovuti all'unità esterna, tenendo però presente la necessità di attenuare sufficientemente sia il rumore presente alla frequenza immagine, sia gli eventuali canali, trasmessi da Olympus o da altri satelliti, che possono essere causa di interferenze.

A questo scopo, in base al tipo di modulazione (QPSK) e alla velocità di trasmissione (70 Mbit/s), un compromesso soddisfacente è risultato quello di adottare:

- una larghezza di banda di circa 100 MHz a − 3 dB per il filtro passabanda d'ingresso alla 1ª FI;
- una banda fino a circa 200 MHz entro 0,2 dB per il filtro passa basso alla 2ª FI.

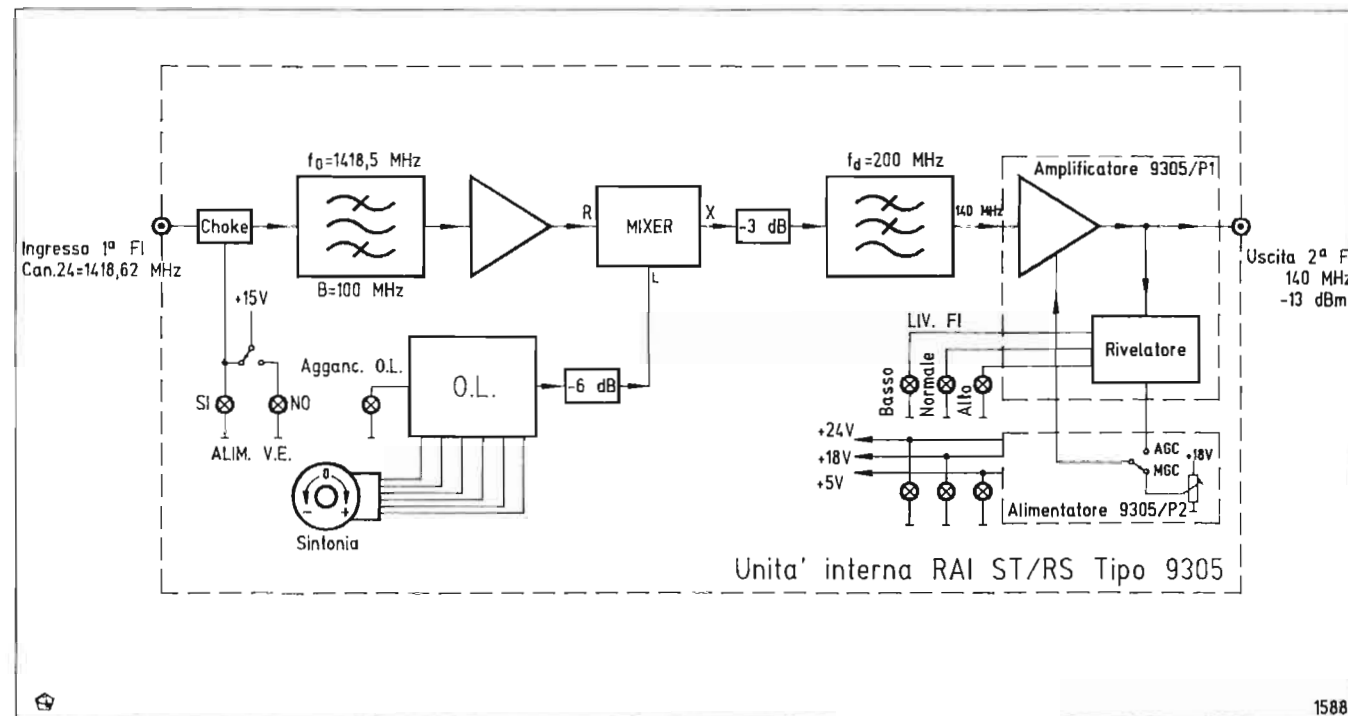



Fig. 6 — Apparati di conversione di frequenza, demodulazione e decodifica audio e video ubicati nella Sede RAI a Palazzo Labia (Venezia).

Con queste caratteristiche dei filtri, il ritardo di gruppo complessivo è risultato contenuto entro 5 ns in 35 MHz.

5.6 PRESTAZIONI

Le prestazioni dell'unità interna si sono rivelate corrispondenti alle aspettative.

Infatti si è riscontrato che il sistema ricevente composto dall'unità esterna e da quella interna, collegate tra di loro con 50 metri di cavo tipo RG214/U, forniva con il simulatore di satellite a parità di condizioni di misura, gli stessi valori di tasso di errore in funzione del C/N misurati con il convertitore dalla 1ª FI a 140 MHz dello stesso simulatore di satellite, che utilizza un generatore RF professionale quale oscillatore locale.

Alle stesse conclusioni si è giunti provando una condizione di maggiore distanza tra unità esterna e unità interna, con 4 spezzoni di cavo 50 emtri ciascuno, collegati l'un l'altro tramite amplificatori da 17 dB (complessivamente 3): anche in questo caso i risultati ottenuti non si discostavano da quelli relativi alla sola coppia mo-demodulatore più simulatore di satellite.

6. Demodulatore QPSK

La scelta del tipo di mo-demodulatore QPSK da utilizzare (il modulatore per le due stazioni trasmittenti, fissa e mobile, il demodulatore per le postazioni riceventi) ha comportato un notevole lavoro preparatorio, consistente dapprima nel cercare di reperire, tra i modelli di produzione industriale, quelli adatti a funzionare al bit-rate necessario (60 ÷ 70 Mbit/s), poi nell'effettuare misure con il simulatore di satellite per individuare quel modello che assicurava le prestazioni migliori.

Al termine, la scelta è caduta sul mo-demodulatore prodotto dalla ditta tedesca ANT.

Le caratteristiche più significative del demodulatore sono le seguenti:

— Frequenza FI d'ingresso	140 MHz
— Tolleranza offset frequenza	±1 MHz
— Livello d'ingresso FI	−13 dBm
— Impedenza d'ingresso FI	75 Ω
— Filtro FI	largo
— Tipo carrier recovery	Costa's loop, collegato con clock recovery e ricerca con rampa
— Tipo clock recovery	PLL con quarzo e ottimizzazione dell'istante di campionamento
— Filtro di banda base	radice coseno rialzato, α = 0,5, con equalizzatore di ritardo di gruppo
— Bit-rate di modulazione	69,87 Mbit/s (al demultiplex)
— N° uscite digitali	2 (dal demultiplex)
— Bit-rate uscite	34,368 Mbit/s
— Impedenza di uscita	75 Ω
— Tipo di segnale	HDB3
— Decodifica	differenziale (nel demultiplex)
— Descrambler	uno per ogni flusso a 34 Mbit/s (nel demultiplex), di tipo autosincronizzante
— Fattore di moltiplicazione degli errori	5 (decodifica differenziale e descrambler)

ITALIA '90: POSTAZIONI RICEVENTI PER TRASMISSIONI PUNTO-MULTIPUNTO DI HDTV NUMERICA DA SATELLITE

Per le corrispondenti caratteristiche del modulatore si rimanda all'articolo sulle stazioni trasmittenti contenuto in questa stessa pubblicazione (bibl. 6).

Le prestazioni del mo-demodulatore, in loop FI, sono tipicamente un $E_b/N_0 = 9{,}5$ dB necessario per un tasso di errore di 10^{-4}, contro un valore ideale di 8,4 dB.

7. Decodificatore video

Il decodificatore come il codificatore RAI/Telettra è oggetto di un articolo su questa stessa pubblicazione (bibl. 8).

8. Convertitore Digitale/Analogico

I convertitori A/D e D/A saranno oggetto di un articolo su questa pubblicazione.

9. Decodificatore audio

Si richiedeva la trasmissione di un segnale audio stereofonico e di un segnale audio monofonico (quest'ultimo per l'effetto «surround»), tutti di alta qualità.

Poiché sul co-decodificatore HDTV era disponibile un flusso a 2 Mbit/s per la trasmissione dei canali musicali, sono stati adottati gli apparati del sistema tipo MSD-5 della Telettra.

Gli apparati sono multiplex e demultiplex numerici adatti alla trasmissione di un massimo di 5 canali audio musicali monofonici, con sistema PCM, ad un bit-rate di 2,048 Mbit/s: il codice di linea è di tipo HDB3, in accordo con la Racc. G.703 del CCITT.

I canali musicali hanno una banda di 15 KHz, adottano l'enfasi della Racc. J.17 del CCITT e sono utilizzabili a coppie nel caso di trasmissione di programmi stereofonici.

La velocità di campionamento per ciascun canale è di 32.000 campioni al secondo, con codifica lineare a 14 bit per campione e compressione istantanea a 11 bit, secondo la legge di compressione/espansione a 11 segmenti (Doc. CMTT/186-S): con l'aggiunta del bit di parità, la parola codificata passa a 12 bit e pertanto la velocità di trasmissione di un singolo canale musicale è di 384 kbit/s.

Il demultiplex è provvisto di un sistema di correzione degli errori basato sul bit di parità, con sostituzione dell'ultimo campione corretto al posto di quello errato, fino a 3 campioni errati consecutivi, oltre i quali interviene un particolare sistema di silenziamento graduale che impedisce la generazione di «click» in altoparlante.

10. Matrici

Come già annunciato nel capitolo 2, la presenza delle matrici si rende necessaria in quanto il segnale video HDTV in uscita dal convertitore D/A è nella forma Y, B-Y, R-Y.

Inoltre, poiché le condizioni di matricizzazione nei due standard in esperimento sono diverse, occorrono due apparati differenti.

Le matrici in questione, realizzate dal *Centro Ricerche* RAI constano di alcuni stadi di amplificazione e adattamento di impedenza del segnale video di ingresso, a cui fanno seguito le reti resistive di ricombinazione ed un circuito di uscita amplificatore e traslatore di impedenza, in grado di alimentare con 1 V_{pp} una linea video a 75 Ohm.

Occorre porre molta cura nel realizzare gli stadi amplificatori antecedenti le reti combinatorie. Infatti piccole diversità nei ritardi di propagazione (alcuni nanosecondi) determinano delle esaltazioni o attenuazioni della banda passante alle alte frequenze: ciò in quanto le frequenze video al limite della banda sono dell'ordine dei 30 MHz, a cui corrispondono 33 ns di periodo. Uno sfasamento di soli 3,3 ns tra i segnali dei tre canali determina, dopo i processi di somma o differenza, errori di ampiezza già apprezzabili sui segnali R, G, B.

Altrettanto delicata risulta la scelta delle resistenze di matrice. Queste devono essere di precisione e di valore fisso, onde garantire la stabilità termica e la stabilità nel lungo termine.

In accordo con la Raccomandazione n. 240M dello SMPTE, le espressioni di riferimento per il calcolo delle matrici a 60 Hz sono:

$$Y = (0{,}701 \cdot G) + (0{,}087 \cdot B) + (0{,}212 \cdot R)$$
$$B\text{-}Y = (-0{,}701 \cdot G) + (0{,}913 \cdot B) + (-0{,}212 \cdot R)$$
$$R\text{-}Y = (-0{,}701 \cdot G) + (0{,}087 \cdot B) + (-0{,}788 \cdot R)$$

da queste si ricavano i segnali di crominanza trasmessi:

$$P_b = (-0{,}384 \cdot G) + (0{,}500 \cdot B) + (-0{,}116 \cdot R)$$
$$P_r = (-0{,}445 \cdot G) + (-0{,}050 \cdot B) + (0{,}500 \cdot R)$$

ponendo:

$$P_b = \frac{B-Y}{1{,}826} \qquad P_r = \frac{R-Y}{1{,}576}$$

In accordo con la Raccomandazione n. 601[1] del CCIR, le espressioni di riferimento per il calcolo delle matrici a 50 Hz sono:

$$Y = (0{,}587 \cdot G) + (0{,}114 \cdot B) + (0{,}229 \cdot R)$$
$$B - Y = (-0{,}587 \cdot G) + (0{,}886 \cdot B) + (-0{,}299 \cdot R)$$
$$R - Y = (-0{,}587 \cdot G) + (-0{,}114 \cdot B) + (0{,}701 \cdot R)$$

si ottengono analogamente a prima:

$$C_b = (-0{,}331 \cdot G) + (0{,}500 \cdot B) + (0{,}169 \cdot R)$$
$$C_r = (-0{,}419 \cdot G) + (-0{,}081 \cdot B) + (0{,}500 \cdot R)$$

ponendo:

$$C_b = \frac{B-Y}{1{,}77} \qquad C_r = \frac{R-Y}{1{,}40}$$

1: All'atto dell'esperimento, il riferimento della colorimetria europea (50 Hz) era ricavato dalla Raccomandazione CCIR 601.

Dalle suddette equazioni si ricavano pertanto le espressioni dei segnali R, G, B da inviare al display.

4) Esatta individuazione della fase del sincronismo, utilizzando come riferimento l'istante di transito per lo zero del secondo fronte, o fronte positivo.

11. Generatori di sincronismi HDTV 50 Hz e 60 Hz

Fin dall'inizio delle sperimentazioni sui sistemi HDTV, i generatori di sincronismo (PG) sono stati un elemento notevolmente critico, in modo particolare per lo standard 50 Hz. Infatti, non esistendo normative certe, tali apparati non erano disponibili sul mercato.

Presso il Centro Ricerche della RAI si è pertanto provveduto da tempo allo studio e sviluppo di generatori di sincronismi HDTV a 50 Hz e a 60 Hz, con caratteristiche di versatilità tali da poter sopperire alle molteplici necessità di uso e da permettere adattamenti alle eventuali variazioni dello standard specifico.

Le caratteristiche più interessanti di questi PG sono:

- generazione dei segnali di base: H, V, Blk V, Blk H;
- generazione dei segnali di SS, sia nella forma tradizionale di Bisinc (polarità solo negativa), sia nella forma specifica di Trisinc (doppia polarità);
- possibilità di genlock con segnale di riferimento Trisinc o H e V separati;
- possibilità, in condizione di genlock, di spostamento della fase dei segnali generati rispetto alla fase del segnale di riferimento;
- possibilità di doppio andamento delle fasi dei segnali H, V, SS, onde ottenere una tessitura di immagine a 1250 Hz interallacciato oppure 625 Hz progressivo;
- possibilità di usufruire in RGB di un segnale di barre e di un segnale di graticcio generati internamente.

Il segnale di sincronismo denominato Trisinc è un nuovo segnale ideato espressamente per la televisione ad alta definizione. Esso sostituisce il tradizionale SS (e suoi derivati quali il Black Burst) della televisione tradizionale. Trattasi quindi di un segnale di sincronismo composito, di tipo analogico, portatore contemporaneamente della informazione di riga H e di semiquadro V con livello negativo di 0,3 V. Pertanto è perfettamente adatto alla formazione di segnali video compositi di 1 V_{pp}. Il suo andamento completo è a ciclo bipolare (vedi figura 7). Tale caratteristica costituisce la novità essenziale: infatti da essa scaturiscono le sue peculiarità funzionali.

I principali vantaggi offerti dal Trisinc sono:

1) Possibilità di utilizzare il Trisinc come un normale SS tradizionale. Questo in quanto esiste la possibilità di allineamento automatica del picco negativo, con la conseguente eliminazione delle eventuali distorsioni di inviluppo e la successiva semplice separazione del sincronismo dal segnale video.
2) Superiore garanzia di giusta individuazione del sincronismo, utilizzando il primo fronte negativo come preset ed il successivo fronte positivo come sincronismo.
3) Possibilità di utilizzare il Trisinc come un normale SS individuando semplicemente il primo fronte o fronte negativo. Questa particolarità permette di sincronizzare di H anche con il segnale Trisinc alcuni apparati progettati per sincronismi tradizionali.

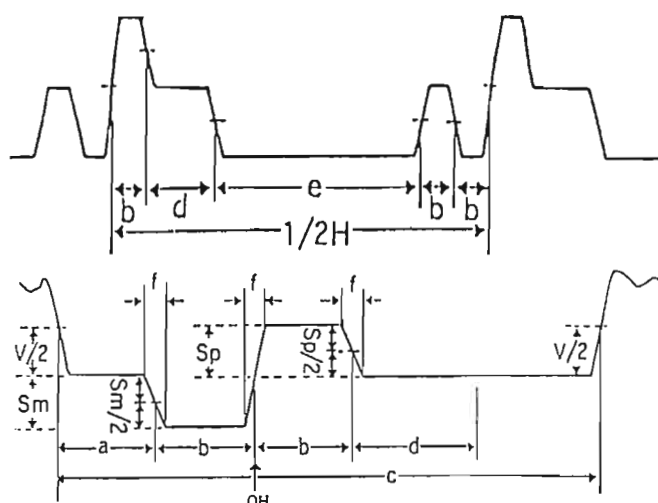



Fig. 7 — Rappresentazione grafica e caratteristiche del segnale di sincronismo Trisinc.

Quest'ultima possibilità risulta essere la più interessante in quanto da essa derivano i maggiori vantaggi, cioè:

- minore sensibilità al rumore grazie alla possibilità di filtraggio del segnale (riduzione del jitter);
- scarsa sensibilità alle distorsioni lineari del canale di trasmissione, in quanto l'istante esatto di sincronismo è individuato dal passaggio per lo zero di un segnale simmetrico;
- indifferenza alle distorsioni non lineari, in quanto inesistenti nell'istante di zero.

Da quanto illustrato deriva la importante possibilità di poter utilizzare con perfetta fasatura reciproca un segnale video presentato nella forma di tre segnali compositi in componenti o di tre segnali compositi R, G, B.

12. Distributori/Equalizzatori

L'esigenza di distribuire, all'interno dell'impianto ricevente, il medesimo segnale video su più linee e contemporaneamente di compensare le perdite in banda introdotte dai cavi di cablaggio e collegamento (vedi figura 1), ha richiesto l'utilizzatore di opportuni distributori/equalizzatori in grado di trattare segnali HDTV. Questi apparati sono stati prodotti dalla ditta italiana Elpro, in collaborazione con gli specialisti del Centro Ricerche RAI. Tale collaborazione ha permesso

Fig. 8 — Sale visione presso l'ex Stabilimento della FIAT «Lingotto» a Torino.

di ottenere una ottimizzazione del prodotto, sia dal punto di vista elettrico che meccanico, e con essa una elevata versatilità e affidabilità. Affidabilità confermata dalla totale assenza di avarie durante tutto il periodo dell'esperimento.

Le caratteristiche funzionali di tali apparati sono così riassumibili:

- possibilità di compensare linee di lunghezza variabile da 0 a 100 metri di cavo coassiale RAI (il cavo coassiale RAI e sostanzialmente un cavo di tipo RG59, ma con doppia calza schermante);
- banda passante estesa da 25 Hz a 30 MHz entro ±0,2 dB con 3 carichi da 75 Ohm, corrispondenti al 50% del carico massimo;
- ampiezza dei segnali in transito di 0,7 V_{pp}, se segnali di sola luminanza, oppure segnali di 1 V_{pp} se completi di sincronismi. Tali ampiezze, inoltre, sono accettabili per segnali fino al limite della banda e in qualsiasi condizione di equalizzazione;
- impedenza di uscita bassa, e costante al variare della frequenza, fino a contenere le variazioni del livello del segnale di uscita entro ±0,5 dB per qualsiasi frequenza e per variazioni di carico da una a sei linee a 75 Ohm.
- possibilità di trattare anche segnali di sincronismo al massimo livello di standard (4 V_{pp}).

13. Conclusioni

Le postazioni riceventi allestite presso varie città italiane per dimostrare, in prima mondiale, il nuovo sistema di HDTV numerica a 70 Mbit/s per collegamenti punto-multipunto, hanno richiesto l'impegno congiunto di un gruppo di specialisti del *Centro Ricerche* RAI e della fattiva collaborazione di importanti industrie nazionali per progettare e realizzare gli apparati speciali per il trattamento del segnale numerico.

Le stazioni riceventi, sebbene costituite in gran parte da apparati sperimentali o da prototipi realizzati in tempi molto stretti, hanno operato in modo assolutamente soddisfacente ed affidabile, senza alcun disservizio in oltre 40 giorni di attività, anche in condizioni meteorologiche avverse.

(3927)

BIBLIOGRAFIA

1. - M. Ardito, G.F. Barbieri, M. Cominetti: *ITALIA '90: una prima mondiale di collegamento HDTV numerico via satellite OLYMPUS*, in questo stesso numero.
2. - G.P. Pacini: *Antenne riceventi per diffusione diretta da satellite*, «Elettronica e Telecomunicazioni», n. 2 e 3, 1989.
3. - M. Cominetti, A. Morello: *Trasmissione numerica punto-multipunto via satellite di segnali HDTV*, in questo stesso numero.
4. - G.P. Pacini: *Satellite Olympus-F1*, «Elettronica e Telecomunicazioni», n. 2 e 3, 1989.
5. - M. Ariaudo, F. Cuccia, P. Forni: *Convertitori a microonde per la ricezione da satellite: disponibilità commerciale, caratteristiche misurate, stabilità in frequenza*, «RAI - Centro Ricerche», Relazione Tecnica n. 89/15/I.
6. - G. Moro, B. Sacco, D. Tabone: *ITALIA '90: Stazioni trasmittenti di segnali HDTV numerici via satellite*, in questo stesso numero.
7. - G. Garazzino, A. Morello, B. Sacco: *Prove di trasmissione di segnali HDTV a 70 Mbit/s via OLYMPUS dalla stazione del CPTV di Roma*, «RAI - Centro Ricerche», Relazione Tecnica n. 90/01/I.
8. - M. Barbero, S. Cucchi: *ITALIA '90: Codifica del segnale televisivo numerico*, in questo stesso numero.

Fantasia

ITALIA '90: SISTEMA DI PROIEZIONE HDTV

D. TOGNETTI, S. DEL CONT BERNARD*

SOMMARIO — L'articolo illustra le tecniche realizzative del proiettore HDTV Seleco, utilizzato per visualizzare le riprese televisive in Alta Definizione delle partite del Campionato Mondiale di Calcio '90. L'articolo intende evidenziare inoltre i fattori tecnologici sui quali si interverrà nell'immediato futuro per incrementare ulteriormente le prestazioni del sistema.

SUMMARY — ***HDTV Projection System.*** *- The paper illustrates the implementation techniques of the Seleco HDTV projector, used to display some shootings of the football matches during the 1990 Worldcup in Italy. The article aims at pointing out the technological factors to be improved in the near future in order to further increase the sistem performance.*

1. Introduzione

Nel settore della videoproiezione, dominato finora da grandi aziende multinazionali (Sony, Panasonic, General Electric), sta rapidamente emergendo SELECO, la società elettronica italiana che, grazie alla sua attività nell'ambito dei progetti europei (in particolare il progetto Eureka per l'Alta Definizione) e ad una ormai consolidata collaborazione con i laboratori del Centro Ricerche RAI, intende proporsi come azienda di riferimento in Europa in questo settore dei videoproiettori che, nel caso dell'Alta Definizione, rappresenteranno verosimilmente il primo prodotto ad essere immesso sul mercato.

2. La proiezione HDTV su grande schermo

Durante lo svolgimento del campionato mondiale di calcio 1990, le riprese effettuate in Alta Definizione, sono state visualizzate, presso le sale visione RAI predisposte a Milano, Venezia, Perugia e Napoli, da proiettori televisivi ad Alta Definizione della SELECO S.p.A.

I sistemi di proiezione rappresentano attualmente una modalità fondamentale per la presentazione di immagini televisive su schermi di grande formato (oltre i 100 pollici di diagonale). È noto infatti che le dimensioni dei tubi a raggi catodici (CRT) sono limitate da fattori tra i quali principalmente la resistenza meccanica alla pressione esercitata dall'atmosfera e il conseguente peso del vetro. Pertanto immagini di grande formato possono essere ottenute con un CRT soltanto mediante un ingrandimento ottico e quindi con un sistema di proiezione. Poiché le immagini in Alta Definizione sono apprezzate maggiormente su grandi schermi, ne consegue la naturale vocazione dei sistemi di proiezione per la visualizzazione delle informazioni in HDTV.

Il sistema di proiezione, da un punto di vista elettronico, è sostanzialmente un triplo monitor: tre immagini, nei colori fondamentali rosso, verde e blu vengono prodotte su tre CRT di piccolo formato ed alta luminosità. Le tre immagini, presenti sul piano del fosforo dei CRT, vengono focalizzate da un sistema di lenti sul piano dello schermo secondo le consuete leggi dell'ottica geometrica; sullo schermo, che possiede proprietà riflettenti, le immagini si sovrappongono esattamente producendo l'immagine a colori percepita dallo spettatore.

Si comprende quindi che i blocchi fondamentali che concorrono all'ottenimento della luminosità e della risoluzione richieste per l'Alta Definizione sono quattro:

1) l'elettronica di pilotaggio del CRT;
2) il CRT;
3) l'ottica di proiezione;
4) lo schermo riflettente.

In particolare la luminosità della immagine sullo schermo L_d (in c_d/m^2) è così esprimibile:

$$L_d = G\, L_t \frac{T}{4\, F^2 (1 + M^2)}$$

in cui:

- G è il guadagno dello schermo rispetto allo schermo lambertiano;
- L_t è la luminosità dell'immagine sul CRT in c_d/m^2;
- T è il coefficiente di trasmissione dell'ottica di proiezione;
- F è f/A (rapporto tra lunghezza focale e apertura);
- M è l'ingrandimento del sistema di lenti.

La risoluzione viene invece caratterizzata mediante una

---

* Ing. Dante Tognetti Direttore Ricerca e Sviluppo della SELECO S.p.A.; Ing. Stefano Del Cont Bernard Responsabile Settore Videoproiezione della SELECO S.p.A.

Dattiloscritto pervenuto alla Redazione il 12 settembre 1990.

funzione di trasferimento MTF (modulation transfer function) che esprime la percentuale di rapporto di contrasto nell'immagine di uscita (sullo schermo) rispetto all'immagine di ingresso (sul CRT). La funzione viene quantificata con percentuale in corrispondenza a date frequenze spaziali costituite da linee alternativamente bianche e nere (rapporto di contrasto 100%). L'MTF complessivo di un proiettore TV è il prodotto dei singoli MTF lungo la catena ottica: CRT, lenti e schermo. Il risultato finale, inteso come massima frequenza del segnale visualizzabile sullo schermo, sarà dato dalla cascata della funzione di trasferimento elettrica degli amplificatori video e dell'MTF della catena ottica.

Per il CRT è consuetudine esprimere la risoluzione in termini di larghezza della traccia riferita ai punti in cui essa possiede una luminosità pari al 50% del massimo (ricordiamo che il profilo di luminosità di una traccia, in direzione perpendicolare a quella della traccia stessa, è approssimativamente di tipo gaussiano). Come valore indicativo si osserva che una traccia con larghezza di 80 micrometri può essere considerata equivalente ad un MTF del 60% alla frequenza spaziale di 5 l_p/mm (5 linee pari per mm significa 5 linee nere e 5 bianche alternate su un intervallo di 1 mm), oppure una risoluzione limite di 12 l_p/mm (frequenze superiori non sono visibili).

L'MTF di un sistema di lenti per proiezione ad alta risoluzione si aggira su valori del 50% a 10 l_p/mm, mentre per gli schermi i valori di MTF sono normalmente superiori sia ai corrispondenti valori per i CRT che per le lenti. Da queste considerazioni e dall'analisi di quanto tecnologicamente disponibile in tema di componenti, emerge che l'elemento fondamentale e punto debole di tutta la catena è rappresentato dal CRT, mentre l'elettronica di pilotaggio e l'ottica, raggiungono le prestazioni richieste per ottenere una immagine in alta definizione. Ulteriore fatto di debolezza del CRT è la forte dipendenza della sua MTF dalla luminosità dell'immagine, con il risultato di perdita di definizione in presenza di immagini ad elevato contrasto e luminosità, condizione spesso richiesta con i proiettori TV, per compensare l'effetto della luce ambientale diffusa.

Il compito della SELECO S.p.A. è stato quindi quello di sviluppare la parte elettronica in accordo con le specifiche richieste per i sistemi in HDTV, mentre per quanto riguarda CRT, lenti e schermi sono stati avviati contatti con le aziende leader in campo mondiale, nei singoli settori, al fine di individuare i componenti con le prestazioni richieste ed eventualmente definire le specifiche per componenti di tipo custom.

3. Parte elettronica

Su questo versante si è svolto la gran parte del lavoro progettuale della SELECO. I blocchi fondamentali possono essere così elencati:

- canale video (amplificatori) per ciascuna componente RGB;
- processore di sincronismi;
- stadi di potenza per le deflessioni orizzontale e verticale;
- sistema di correzione geometrica N-S ed E-W;
- sistema di convergenza dinamica (peculiare dei proiettori televisivi);
- sistema di focalizzazione elettrica dinamica.

a questi blocchi si deve aggiungere il sistema separato di generazione dell'alta tensione (EHT), gli alimentatori e il sistema distribuito di protezione contro i guasti (con particolare attenzione all'alta tensione).

I tre canali video RGB sono a loro volta costituiti da tre parti: un buffer differenziale d'ingresso avente il compito di eliminare eventuali componenti di modo comune, un amplificatore intermedio su cui agiscono il controllo di contrasto e di luminosità, e un amplificatore finale con massima tensione picco-picco di uscita di 110 V. L'ingresso è di tipo RGB con ampiezza 0,7 volt.

Lo standard HDTV europeo indica in 27 MHz la larghezza di banda del segnale (con periodo orizzontale di scansione di 32 microsecondi). Poiché il proiettore SELECO ha come modalità operativa anche la scansione orizzontale a 16 microsecondi (per impiego con segnali HDTV a frequenza di quadro di 100 Hz), la banda video (a − 3 dB) necessaria risulta essere di 54 MHz. Dal momento che il segnale elettrico viene tradotto in segnale ottico sul piano del fosforo ed il segnale ottico subisce, prima di arrivare allo spettatore, una ulteriore degradazione dovuta alla MTF del sistema ottivo di proiezione, si è convenuto di adottare amplificatori con banda maggiore di 54 MHz. Attualmente la larghezza di banda impiegata nella catena video, dall'ingresso RGB al catodo del CRT, è di 80 MHz a − 3 dB.

Il processore di sincronismi svolge il compito di pilotare gli stadi di potenza delle deflessioni, avendo come ingresso i segnali di sincronismo. Al fine di permettere la massima flessibilità di impiego è stata prevista la possibilità di applicare all'ingresso i segnali di sincronismo nei seguenti formati:

1) separato H-V, con livello TTL e polarità arbitraria;
2) composito TTL con polarità arbitraria;
3) composito analogico;
4) composito analogico sul canale del verde.

La selezione tra i vari formati viene svolta automaticamente. Il processore di sincronismi inoltre prevede la possibilità di funzionamento con frequenza orizzontale di scansione compresa tra 14 kHz e 70 kHz e frequenza verticale tra 40 Hz e 110 Hz in modo da permettere l'impiego non solo per il segnale HDTV ma anche per l'interfacciamento con le schede grafiche di computer e workstation.

Gli stadi di potenza per le deflessioni ricalcano schemi circuitali ormai ampiamente collaudati. La deflessione orizzontale è di tipo risonante serie con transistor interruttori di tipo MOS. Su ciascun giogo orizzontale la corrente picco-picco per la deflessione a pieno raster (angolo max di 70°) risulta essere di circa 8 ampere con un impulso di flyback di 600 volt. La deflessione verticale è realizzata con amplificatori di potenza integrati di tipo audio.

La correzione di geometria N-S ed E-W è realizzata mediante forme d'onda lineari e paraboliche con controllo separato sui quattro semiquadri: alto, basso, destra e sinistra.

La convergenza elettronica è fondamentale nei sistemi di proiezione ed ha lo scopo di portare in perfetta sovrapposizione le immagini proiettate dai CRT sullo schermo, infatti in assenza di convergenza elettronica le tre immagini, che sono proiettate da tre punti diversi, non potrebbero sovrapporsi sullo schermo e pertanto si rende necessaria una predistorsione geometrica delle immagini dei CRT laterali (rosso e blu) in modo che appaiano corrette, dopo la proiezione ottica sghemba dei CRT laterali, rispetto al CRT verticale (verde).

Il tipo di realizzazione adottata va sotto il nome di convergenza analogica ed è caratterizzata dalla possibilità di effettuare, con notevole facilità, le correzioni di convergenza, agendo indipendentemente sui quattro quadranti delle immagini R e B, con predistorsioni di tipo lineare e parabolico.

La focalizzazione nel proiettore HDTV SELECO è di tipo elettrostatico e richiede tensioni di circa 10 kV. In realtà il pennello elettronico, con tensione di focalizzazione costante, non risulterebbe uniformemente focalizzato su tutto lo schermo, in quanto l'ottica elettronica del CRT produce una superficie di focalizzazione in prima approssimazione sferica e quindi non coincidente con il piano del fosforo. Per ottimizzare la focalizzazione si è adottata la tecnica della modulazione della tensione di fuoco mediante forme d'onda quadratiche e ampiezze di modulazione di 400 volt ottenendo in tal modo una focalizzazione uniforme su tutto lo schermo.

La tensione di accelerazione del CRT viene generata mediante un apposito alimentatore in alta tensione. Il suo funzionamento è indipendente dalla scansione di riga in quanto quest'ultima non è fissa, ma può avere frequenze comprese in un campo di più di due ottave, in dipendenza del tipo di segnale video. La tenzione di accelerazione è di 32 kV.

Particolare attenzione è stata dedicata infine alle protezioni contro i guasti, al fine di garantire l'immunità dell'elettronica in corrispondenza a condizioni irregolari di funzionamento. Il sistema distribuito di protezione attua pure una semplice funzione di autodiagnosi per la rapida individuazione di guasti accidentali.

4. Il cinescopio

Il CRT impiegato possiede una diagonale di 9" e raster utile di 7"; la dimensione 9" risulta essere la maggiore praticamente disponibile in quanto vincolata dall'apertura ottica del sistema di lenti per proiezione. Dimensioni maggiori del CRT richiederebbero ottiche custom molto costose e con dimensioni meccaniche notevoli.

Poiché l'immagine HDTV ha un formato 16:9 ne consegue che le dimensioni massime dell'immagine possono essere 155 · 87 mm. La visualizzazione di un segnale a 27 MHz su un tempo di riga attiva di 26,67 microsecondi equivale quindi a circa 4,7 l_p/mm. Pertanto il solo cinescopio avente un MTF del 70% a 4,7 l_p/mm rappresenta un passabasso con frequenza di taglio a 27 MHz.

Purtroppo questi valori di risoluzione risultano essere, allo stato attuale, difficilmente compatibili con le esigenze di luminosità richieste per l'immagine proiettata. Si tratta di un problema peculiare dei cinescopi per proiezione a causa delle piccole dimensioni che implicano contemporaneamente aumento di luminosità ed aumento di risoluzione dello spot in ragione inversa alle dimensioni della diagonale. È opportuno sottolineare che in un monitor per HDTV a visione diretta, lo spot possiede dimensioni notevolmente maggiori e luminosità di molto inferiore al corrispondente spot di un cinescopio per proiezione, si comprende quindi come sia tecnicamente difficile proporre un paragone diretto tra una immagine su cinescopio da proiezione e su cinescopio da visione diretta.

Il CRT impiegato da SELECO possiede una larghezza di traccia al 50% valutabile in 120 micrometri. La tensione anodica impiegata è di 32 kV e la focalizzazione è di tipo elettrostatico. Il CRT possiede una propria cella di raffreddamento a convezione libera riempita con un liquido otticamente trasparente.

Fig. 1 — Sala visione allestita al Centro Congressi della Camera di Commercio a Perugia. Si notino, affiancati, i due proiettori per Alta Definizione (uno dei quali di scorta) ed, in primo piano, il proiettore PAL di emergenza.

5. L'ottica di proiezione

L'ottica di proiezione è di tipo rifrattivo, cioè si tratta di un insieme di lenti con correzione cromatica. Tra la prima lente del gruppo ottico e la superficie del CRT vi è un liquido organico, con opportuno indice di rifrazione, avente lo scopo di compiere un «adattamento» tra i mezzi di propagazione della radiazione ottica. In altre parole il liquido riduce le perdite per riflessione che, per un sistema di proiezione, sono molto dannose in quanto conducono alla generazione di luminosità diffusa sulla superficie del cinescopio abbassando il massimo rapporto di contrasto ottenibile. Il coefficiente di trasmissione, con accoppiamento a liquido, risulta essere dell'80%.

L'MTF dell'obiettivo risulta essere del 50% a 10 l_p/mm su tutto il campo.

Altri due parametri interessanti dell'ottica impiegata sono la lunghezza focale di 167 mm (con ingrandimento di 25, l'ingrandimento varia da 14 a 45) e il parametro f/A avente il valore 1,15.

Allo stato attuale l'ottica rappresenta un elemento critico non tanto per i limiti tecnologici quanto per i costi di produzione degli obiettivi ad alta risoluzione. I costi maggiori sono legati agli obiettivi che utilizzano lenti asferiche in vetro; recentemente costi più contenuti sono stati ottenuti mediante l'impiego di lenti realizzate con materie plastiche.

Tuttavia gli obiettivi da proiezione per alta risoluzione trovano ancora un mercato molto ristretto e in più casi la disponibilità è legata a costosi progetti di tipo custom.

6. Lo schermo di proiezione

Lo schermo rappresenta un elemento chiave per il sistema di visualizzazione, la sua funzione è di raccogliere l'immagine proiettata dall'ottica e rifletterla verso lo spettatore. È evidente che la luminosità dell'immagine dipende in modo diretto dal coefficiente di riflessione della superficie dello schermo, tuttavia il comportamento dello schermo non è dettato solo dalle sue capacità riflettenti, ma soprattutto dalle proprietà diffondenti.

Uno schermo ottimale dovrebbe permettere la visione, con la stessa luminosità, sotto un qualsiasi angolo orizzontale compreso tra + 90° e − 90° rispetto all'asse dello schermo, mentre l'angolo verticale dovrà coprire tutte le possibili posizioni degli spettatori (tipicamente un angolo di 30°).

Quindi la diffusione deve essere direttiva e ciò comporta la possibilità di elevare la potenza ottica diffusa verso lo spettatore, riducendo la corrispondente potenza nelle direzioni non utilizzate. Vi sono schermi aventi guadagni anche sensibilmente superiori all'unità e che producono immagini molto luminose nella direzione dell'asse dello schermo a scapito della luminosità in direzioni molto periferiche, guadagni attualmente raggiungibili si aggirano sul valore 10.

Purtroppo schermi molto direttivi riproducono male la purezza del colore, l'immagine infatti è realizzata dalla sovrapposizione di tre immagini nei colori fondamentali e tali immagini sono proiettate da tre direzioni diverse, la direttività quindi attribuisce a ciascun colore un diverso guadagno dipendente anche dalla posizione dello spettatore e alterando il colore in modo diverso nei diversi punti dello schermo. Il peso del difetto diminuisce comunque con l'angolo di visione, pertanto gli schermi molto direttivi sono egualmente usati dal momento che per essi l'angolo di visione è ovviamente stretto (tipicamente 60°).

La scelta del tipo di schermo è quindi dettata da più fattori e tra questi la distribuzione del pubblico è forse la principale. Infatti dalla suddetta distribuzione discende sia la dimensione dello schermo necessario, sia i massimi angoli di visione e quindi la direttività ed il guadagno dello schermo.

Per l'impiego nelle proiezioni di *Italia '90* si è deciso di impiegare uno schermo a basso guadagno e largo angolo di visione (oltre 120°).

La dimensione della superficie di proiezione è di 140 pollici con un rapporto di 16:9 mentre la distanza tra proiettore e schermo è di circa 4,5 metri.

Fig. 2 — Sala visione a Perugia

7. Conclusioni

Il sistema della videoproiezione rappresenta attualmente una valida tecnica per la visualizzazione di immagini in Alta Definizione grazie alla sua peculiarità di riprodurre immagini su schermi giganti, peculiarità che per prima permetterà l'apertura del mercato HDTV.

Sono inoltre stati evidenziati margini per incrementare ulteriormente le prestazioni, non tanto sul versante circuitale che è ormai sostanzialmente consolidato, quanto sul versante dei cinescopi da proiezione, delle ottiche e degli schermi. In particolare i cinescopi rappresentano il collo di bottiglia: ad essi sarà rivolta particolare attenzione nella futura attività di ricerca assieme allo sviluppo di gruppi ottici a basso costo.

A seguito di questa prima fase di sperimentazione sono stati raggiunti risultati molto incoraggianti e vi sono tutte le premesse per sviluppi, nel prossimo futuro, di grande interesse, sia dal punto di vista tecnologico che di mercato.

(3909)

ITALIA '90: COLLEGAMENTI IN FIBRA OTTICA PER HDTV

G. B. GREBORIO - V. SARDELLA*

SOMMARIO — Il problema di trasferire segnali HDTV su una distanza di alcuni chilometri è stato risolto con collegamenti in fibra ottica monomodale. È stato utilizzato un cavo che fa parte della rete dei collegamenti di contributo della RAI ed è stato posato un cavo aggiuntivo di lunghezza circa 300 m per completare il collegamento. L'articolo descrive le soluzioni adottate per il trasferimento di un segnale numerico formato da due flussi a 34 Mbit/s e di un segnale HDTV analogico le cui componenti sono state trasmesse in tecnica SCM (SubCarrier Multiplexing). Le problematiche e le prestazioni di quest'ultimo collegamento vengono analizzate più in dettaglio.

SUMMARY — ***Optical Fiber Links for HDTV*** *- The problem of transferring HDTV signals over a distance of some kilometres was solved by monomodal optical fiber links. These links were implemented using an optical fiber cable, pertaining to the RAI contribution network, and an additional cable (approximately 300 m long) laid down on purpose. This article describes the solutions adopted for transferring a digital signal consisting of two 34 Mbit/s streams, and an analogue HDTV signal, whose components were transmitted using the SCM (SubCarrier Multiplexing) technique. All the problems and the performance of this last link are analysed more in detail.*

1. Introduzione

Il *Punto di immissione* situato nei pressi dello Stadio Olimpico di Roma è stato collegato al Centro di produzione TV, punto di trasmissione verso il satellite Olympus, per mezzo di fibre ottiche monomodali.

Per questa via sono stati inoltrati il segnale numerico in direzione Punto di immissione - Centro di produzione TV per la trasmissione verso il satellite Olympus ed il segnale video analogico, ricevuto da satellite, in direzione inversa, Centro di produzione TV - Punto di immissione, per controllo.

La figura 1 riporta lo schema a blocchi dei collegamenti.

Il segnale numerico uscente dal codificatore HDTV e formato da due flussi a 34 Mbit/s è stato inviato su due fibre ottiche modulando direttamente in intensità la portante ottica.

Il segnale video monitorio, disponibile in banda base sotto forma di componenti (Y, P_R, P_B) e sincronismi (H, V), è stato trasmesso su altre due fibre utilizzando la tecnica SCM (SubCarrier Multiplexing) con due sistemi a quattro canali ciascuno e convertitori elettro-ottici a banda larga operanti nella seconda finestra ottica. Il sistema era in grado anche di trasmettere i segnali audio utilizzando inseritori - disinseritori audio a 7,5 MHz 4PSK collegati a uno dei canali ancora disponibili.

La scelta di queste soluzioni, non ottimali dal punto di vista dello sfruttamento della capacità di trasmissione dei collegamenti in fibra ottica, è stata dettata non da particolari esigenze tecniche legate alla trasmissione di segnali HDTV, ma dalla struttura dei segnali da trasferire, dalla disponibilità immediata di apparati numerici a 34 Mbit/s e analogici a 4 canali ciascuno e dall'avere a disposizione una certa quantità di fibre ottiche libere.

2. Il collegamento ottico

Lo stadio Olimpico di Roma ed il Centro di produzione TV della RAI sono collegati da un cavo ottico monomodale che fa parte della rete dei collegamenti di contributo della RAI. Questi speciali collegamenti, destinati esclusivamente ad usi interni, sono generalmente equipaggiati con apparati progettati dal *Centro Ricerche* RAI adatti a trasferire segnali audio e video di qualità, ad esempio da studi esterni al punto di messa in onda (bibl. 1 e 2).

Il collegamento Punto di immissione — Centro di produzione TV per l'invio dei segnali HDTV è stato realizzato utilizzando alcune fibre ottiche disponibili nel cavo Stadio Olimpico — CP/TV prolungandole dalla terminazione lato Stadio Olimpico fino al Punto di immissione con cavi speciali posati appositamente.

La lunghezza di questo collegamento aggiuntivo era di circa 300 m ed è stato necessario utilizzare cavi ottici con particolari caratteristiche meccaniche (elevata resistenza a tiro, percussione e schiacciamento) perché il percorso di posa comprendeva alcuni tratti in tubazione, altri aerei, altri su pavimento o terreno con raggi di curvatura ridotti (a volte inferiori al valore indicato dal costruttore del cavo) e protezioni limitate.

(*) Dott. Giovanni Battista Greborio e ing. Vincenzo Sardella del Centro Ricerche RAI (Torino) - Laboratorio Altafrequenza.
Dattiloscritto pervenuto alla Redazione il 21 agosto 1990.

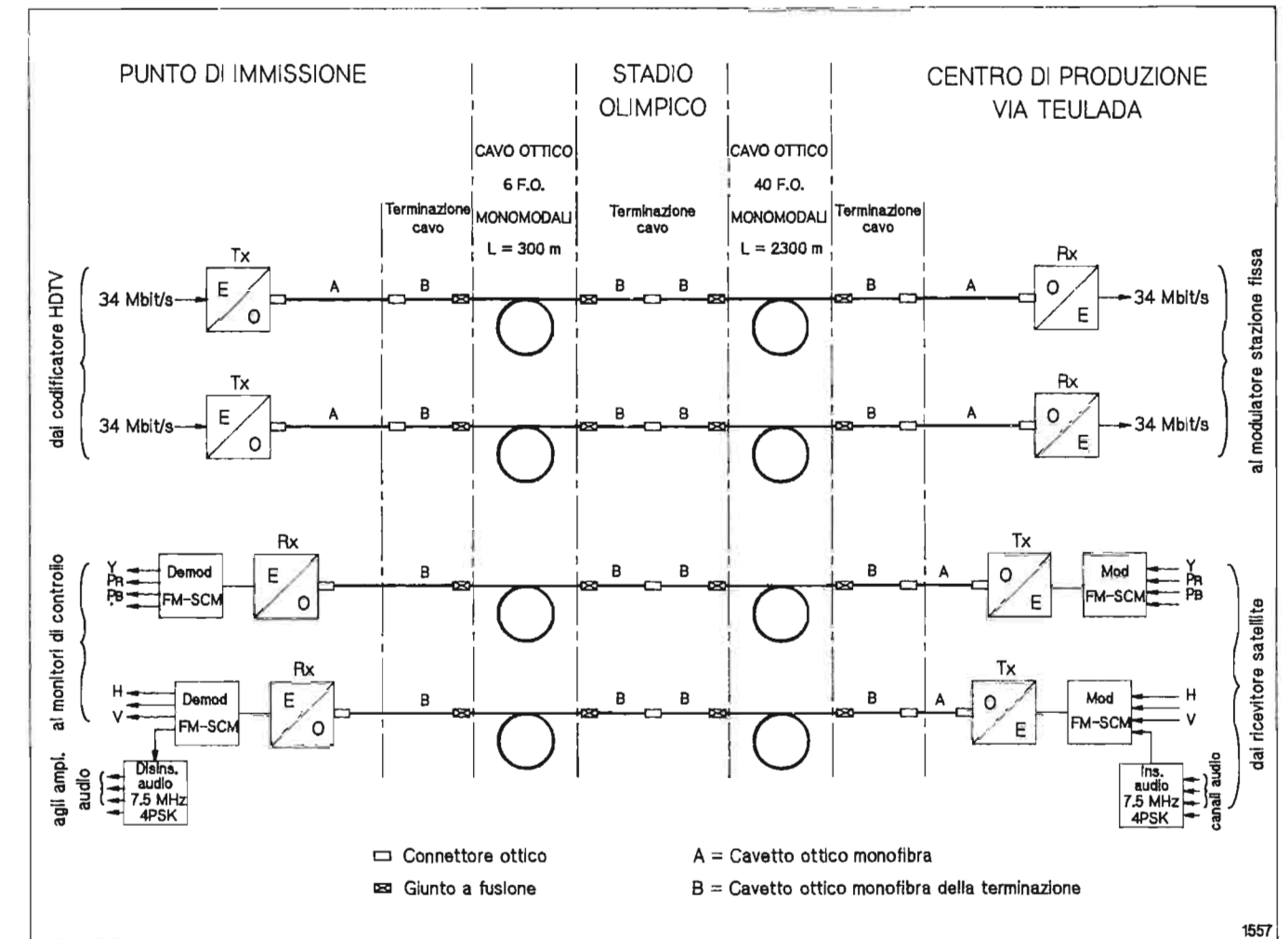



Fig. 1 — Schema a blocchi dei collegamenti in fibra ottica per HDTV.

La scelta è caduta sul cavo ottico a nucleo scanalato tipo PKE a 6 fibre ottiche monomodali interamente dielettrico e autoportante prodotto dalla CEAT CAVI, il cui schema costruttivo è mostrato in figura 2 e le cui principali caratteristiche sono riportate in tabella 1.

Sono stati posati due cavi, uno principale ed uno di riserva, ma nonostante la particolarità dell'impianto e le conseguenti sollecitazioni dovute alla posa, non si sono

Tabella 1.
PRINCIPALI CARATTERISTICHE DEL CAVO OTTICO

N. fibre	6
Tipo fibre	monomodali (Racc. G652 CCITT)
Attenuazione fibre	0,35 dB/km a λ = 1,31 μm
Diametro esterno	13,7 mm
Raggio min. di curvatura	25 cm
Forza max. di trazione	250 kg
Schiacciamento	≤ 2400 kg (IEC 794-1-E3)
Percussione	≤ 12 kg × m (IEC 794-1-E3)

PORTANTE IN VETRORESINA
MODULO SCANALATO
FIBRA OTTICA
TAMPONANTE
LEGATURA
GUAINA PU
KEVLAR
FASCIATURA
GUAINA PE
≃ 5mm
≃ 13mm
1558

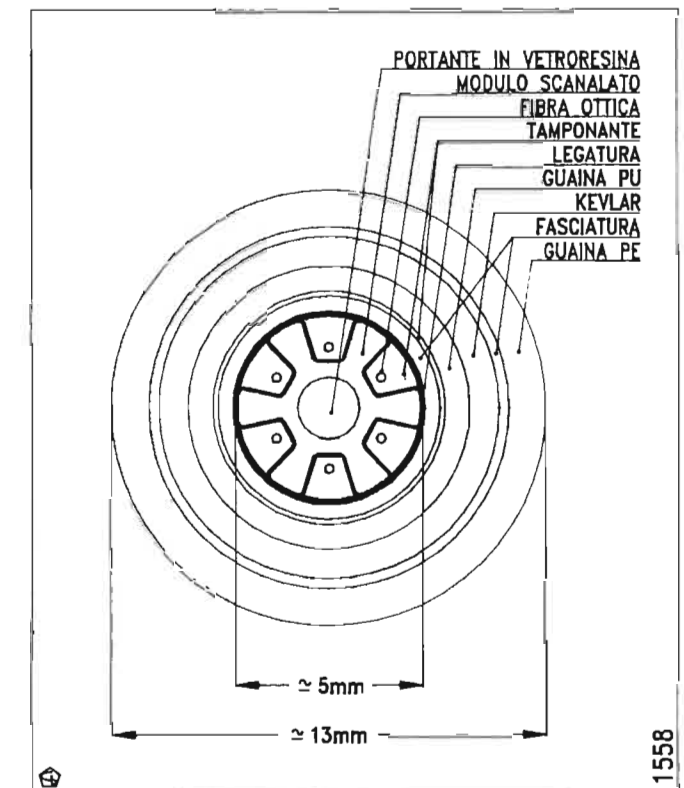



Fig. 2 — Schema costruttivo del cavo ottico a 6 fibre tipo PKE della CEAT CAVI.

avuti danneggiamenti o avarie e quindi non si è dovuto fare ricorso al cavo di riserva.

Prima della installazione degli apparati terminali sono state effettuate una serie di misure ottiche per verificare le attenuazioni delle fibre utilizzate e la bontà dei giunti e dei connettori presenti sul collegamento nei riguardi sia della attenuazione che della riflessione. A titolo di esempio la figura 3 riporta la curva di retrodiffusione di un collegamento CP/TV - Punto di immissione e ritorno.

3. Collegamento HDTV numerico Punto di immissione - CP/TV

Per trasmettere il segnale numerico HDTV sono state utilizzate due fibre ottiche monomodali equipaggiate ciascuna con il sistema di trasmissione TL 73 della Siemens Telecomunicazioni (bibl. 3).

Il trasmettitore ottico è del tipo a laser in 2ª finestra con una potenza ottica media in uscita di − 13 dBm. Esso svolge le funzioni di convertitore di codice (da HDB3 a NRZ) e generatore dei bit di parità per il controllo della qualità di trasmissione, effettua lo scrambling ed infine la conversione elettro-ottica del segnale.

Il ricevitore ottico svolge le funzioni complementari al trasmettitore rivelando il segnale ottico tramite un fotodiodo a valanga (APD). La sua sensibilità è di − 42,5 dBm (per un tasso d'errore di 10^{-9}) ed il suo campo di AGC è di circa 20 dB di potenza ottica. Dal momento che l'attenuazione totale del collegamento ottico era di circa 2 dB è stato necessario inserire all'ingresso del ricevitore un attenuatore ottico da 10 dB.

4. Collegamento HDTV analogico monitorio CP/TV - Punto di immissione

Per la trasmissione dei segnali monitori disponibili sotto forma di componenti analogiche (Y, P_R, P_B), dei sincronismi (H, V) e dei canali audio in sottoportante si è fatto uso della tecnica FM-SCM, che consiste nel modulare in frequenza più portanti RF con i segnali di banda base ed accorpare i segnali così ottenuti per formare un multiplex di frequenza che successivamente modula in intensità la sorgente ottica; in ricezione vengono effettuate le operazioni inverse (bibl. 4 e 5).

Gli apparati utilizzati sono stati modem a quattro canali allocabili nella banda 40 ÷ 580 MHz della ditta Teko Telecom e convertitori elettro-ottici della ditta Pirelli Focom.

Dovendo trasmettere sei segnali è stato necessario ricorrere a due sistemi identici collegati su due fibre ottiche.

I modem sono stati derivati da un sistema multicanale, prodotto per il normale video composito, e modificati per estendere la banda base a 30 MHz. Le caratteristiche principali di ciascun canale sono:

Banda passante	10 Hz ÷ 30 MHz entro ± 1 dB
Deviazione di frequenza	± 15 MHz/1,5 V_{pp}
Frequenza di uscita	40 ÷ 580 MHz
Larghezza di banda IF	120 MHz
S/N video non pesato	≥ 50 dB in banda 30 MHz (P_{ric} = − 25 dBm)

I convertitori elettro-ottici, opportunamente modificati per adattarli alla particolare applicazione, operano alla lunghezza d'onda di 1,31 μm ed hanno le seguenti caratteristiche:

Banda passante	20 ÷ 600 MHz entro ± 1 dB
Potenza ottica Tx	≈ 0,8 mW in F.O. SM 9/125 μm
Potenza ottica Rx	5 ÷ 300 μW

Per collegamenti analogici con segnali multiplati in frequenza, le non linearità del sistema generano prodotti di intermodulazione che possono cadere entro le bande di frequenza utilizzate. Per questo motivo le portanti RF nei due collegamenti sono state scelte tenendo conto delle non linearità delle sorgenti ottiche per minimizzare il numero dei prodotti di intermodulazione che cadono all'interno dei vari canali e che danno origine a segnali di battimento in banda base.

L'allocazione delle portanti è risultata la seguente:

Collegamento 1	Collegamento 2
f_1 = 155 MHz	f_1 = 160 MHz
f_2 = 310 MHz	f_2 = 319 MHz
f_3 = 425 MHz	f_3 = 425 MHz
f_4 = 541 MHz	f_4 = 530 MHz

Fig. 3 — Curva di retrodiffusione di un collegamento ottico CP/TV - Punto di immissione - CP/TV:

A: fibra ottica CP/TV - Stadio Olimpico;
B: connessione Stadio Olimpico (1 connettore + 2 giunti a fusione);
C: fibra ottica Stadio Olimpico - Punto di immissione;
D: connessione al Punto di immissione con un'altra fibra ottica (1 connettore + 2 giunti a fusione).

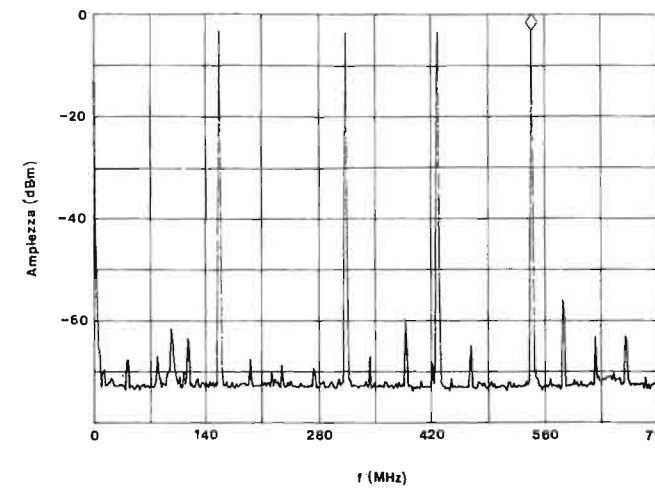
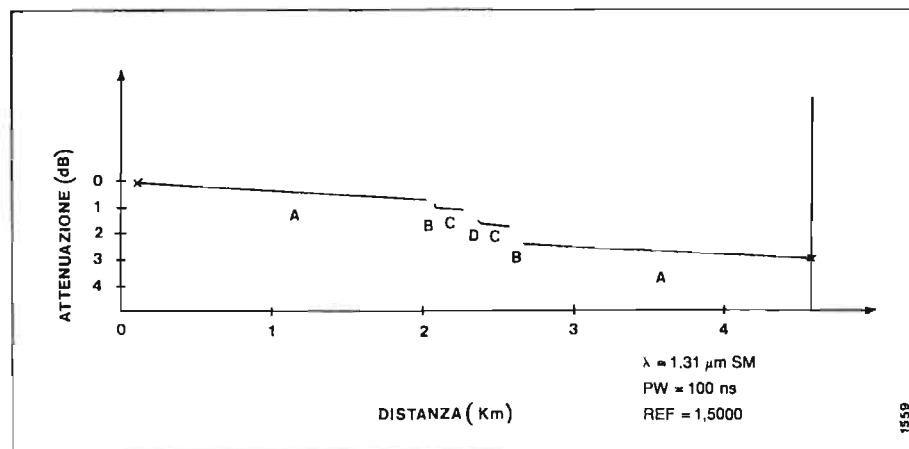



Fig. 4 — Spettro del segnale uscente dal modulatore.

Fig. 6 — Spettro del segnale entrante nel demodulatore relativo alla portante del canale 2.

In laboratorio sono stati caratterizzati tutti i canali disponibili, anche se poi, nella specifica applicazione, non tutti i canali sono stati utilizzati.

Le figure 4, 5, 6 e 7 mostrano gli spettri dei segnali nei vari punti del collegamento 1 simulato su banco nel caso di portanti non modulate.

Confrontando le figure 4 e 5, si può vedere che i prodotti di intermodulazione presenti all'ingresso del demodulatore sono in numero e di ampiezza molto maggiore di quelli presenti all'uscita del modulatore.

Le figure 6 e 7 relative alla portante numero 2 (f_2 = 310 MHz) mostrano come, grazie all'opportuna scelta delle frequenze portanti, i prodotti di intermodulazione cadano solo nell'intorno della portante e siano in numero molto limitato.

Nelle figure 8, 9, 10 e 11 sono mostrati gli spettri di banda base dei 4 canali con tutte le portanti non modulate; in esse si possono notare alcuni segnali di battimento sovrapposti al rumore di fondo.

Per ciascun collegamento, è poi stato ancora ottimizzato il livello del segnale elettrico che va a modulare la sorgente ottica e che influisce sia sul rapporto S/N video ottenibile in ciascun canale (tramite la profondità di modulazione della potenza ottica) sia sull'ampiezza dei prodotti di intermodulazione.

Nel collegamento realizzato su banco, con gli apparati utilizzati poi per il collegamento 1, sono stati misurati i seguenti rapporti segnale/rumore non pesato, nella banda 0 ÷ 30 MHz, in presenza di modulazione su tutti i canali:

Canale	S/N (dB)
1	40
2	41
3	40
4	44

Questi valori sono determinati sia dal rumore vero e proprio che dai prodotti di intermodulazione che, dopo demodulazione, cadono entro il canale di bassa frequenza.

Fig. 5 — Spettro del segnale entrante nel demodulatore.

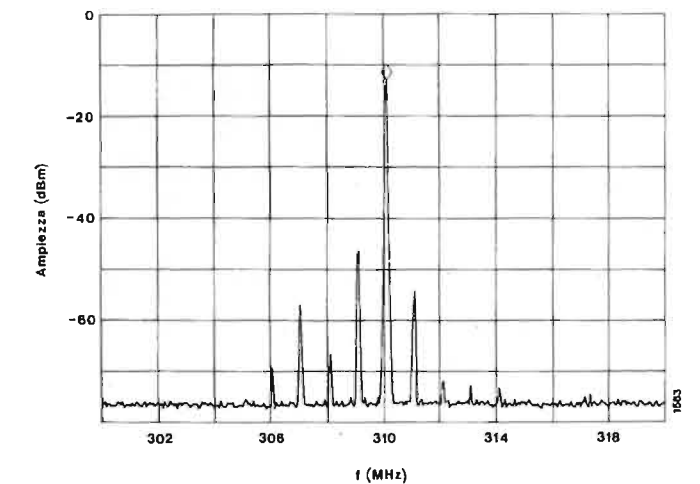



Fig. 7 — Particolare dello spettro di Fig. 6 nell'intorno della portante del canale 2.

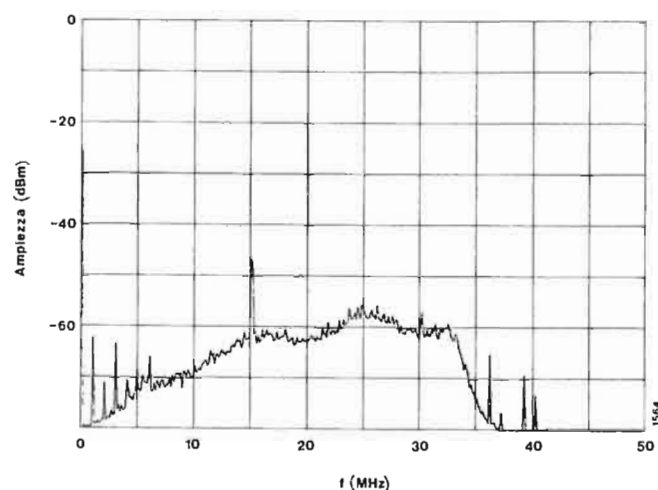



Fig. 8 — Spettro di rumore in banda base del canale 1 senza segnale video applicato.

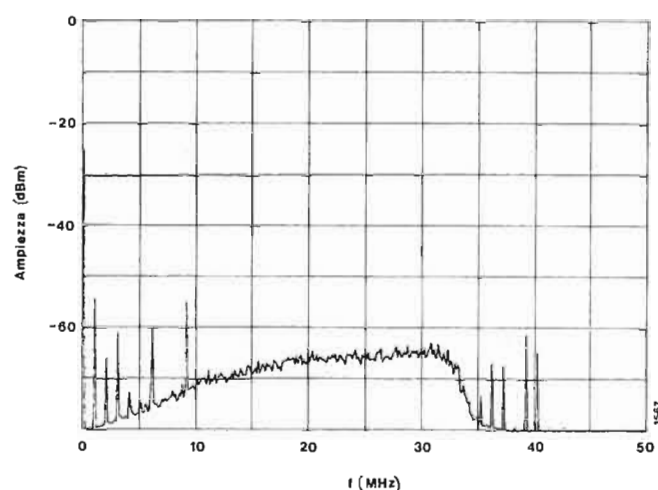



Fig. 11 — Spettro di rumore in banda base del canale 4 senza segnale video applicato.

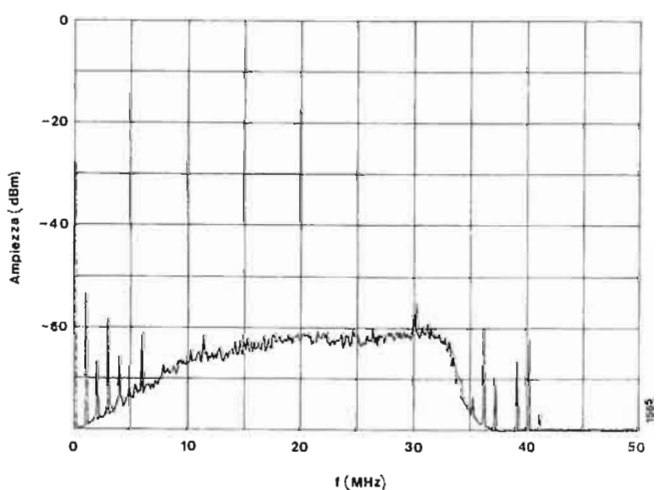



Fig. 9 — Spettro di rumore in banda base del canale 2 senza segnale video applicato.

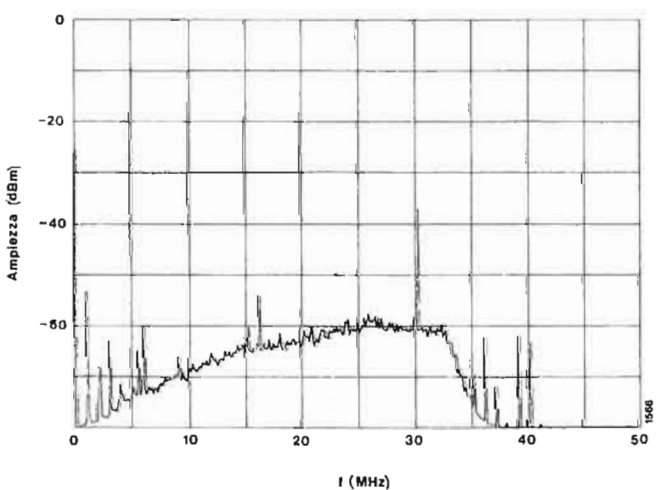



Fig. 10 — Spettro di rumore in banda base del canale 3 senza segnale video applicato.

5. Conclusioni

Le soluzioni adottate per il trasferimento su fibra ottica dei segnali HDTV tra il «punto di immissione», situato presso lo stadio Olimpico, e il Centro di Produzione TV della RAI di Roma si sono rilevate adeguate alle esigenze della sperimentazione dal punto di vista della qualità dei collegamenti e della affidabilità e sicurezza dell'impianto.

La scelta delle tecniche di trasmissione è stata dettata dal formato del segnale HDTV numerico, dalla presenza presso il CP/TV di una catena di ricezione da satellite con uscite analogiche, dal tipo di apparati immediatamente disponibili e dal non avere limitazioni sul numero di fibre ottiche da utilizzare.

Ringraziamenti

Gli autori desiderano ringraziare quanti, colleghi e non, hanno collaborato e si sono adoperati per realizzare in tempi brevi questi collegamenti.

BIBLIOGRAFIA

1. - V. Sardella: *Collegamenti televisivi di contributo su fibre ottiche.* «Elettronica e Telecomunicazioni», n. 2, 1987, p. 85.

2. - G.B. Greborio, V. Sardella: *Collegamenti in fibra ottica S.M. a 70 MHz - apparati tipo 9270.*« Manuale d'istruzione RAI», Aprile 1990.

3. - AA.VV.: *Sistema di trasmissione su fibra ottica a 35 Mbit/s TL73.* «Manuale tecnico Siemens Telecomunicazioni», 11/89.

4. - E. Afasar: *Analog Multichannel TV Transmission on Optical Fibres.* «16th International TV Symposium - CATV Session» - Montreux, 17-22 June 89.

5. - F.V.C. Mendis, P.A. Rosher: *CNR Requirements for subcarrier-multiplexed multichannel video FM transmission in optical fibre.* «Electronics letters», 1989, vol. 25, p. 72.